



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

**STUDIUM ASYMETRICKÝCH VYHLAZENÝCH MŘÍŽEK
VYTVOŘENÝCH ELEKTRONOVOU LITOGRAFIÍ**

STUDY OF ASYMMETRIC BLAZED GRATINGS CREATED BY ELECTRON BEAM LITHOGRAPHY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Brunn

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Stanislav Krátký

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav fyzikálního inženýrství
Student: **Ondřej Brunn**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Fyzikální inženýrství a nanotechnologie
Vedoucí práce: **Ing. Stanislav Krátký**
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Studium asymetrických vyhlazených mřížek vytvořených elektronovou litografií

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Student se seznámí s procesem reliéfní elektronové litografie. Zaměří se především na tvorbu hlubokých asymetrických vyhlazených mřížek. Naučí se pracovat v návrhovém prostředí Layout BEAMER pro přípravu expozičních dat elektronového litografu. Seznámí se s teorií vyhlazených mřížek a jejich aproximací pro potřeby expozice elektronovým litografem. V praktické části student připraví test citlivosti pro různé rezisty a vývojky. Naměřené křivky citlivosti použije jako vstupy pro výpočet expozičních dávek asymetrických vyhlazených mřížek. Navrhne expoziční test asymetrických vyhlazených mřížek, jak pro reflexní, tak transmisní účely. Vyzkouší různé strategie zápisu elektronovým litografem, aby mohl stanovit nejvhodnější způsob tvorby mřížek s ohledem jak na kvalitu mřížek, tak časovou náročnost expozice. Transmisní mřížky připraví pomocí UV replikace do transparentního laku. Připravené struktury vyhodnotí z hlediska kvality expozice (na AFM a SEM) a z hlediska optické kvality (účinnosti a rozložení difrakčních řádů).

Cíle bakalářské práce:

- 1) Připravit citlivostní křivky nutné pro výpočet korekcí jevu blízkosti.
- 2) Navrhnout asymetrické vyhlazené mřížky pro reflexivní a transmisní účely. Využít různé strategie zápisu elektronového litografu.
- 3) Navržené mřížky zhotovit pomocí elektronové litografie v rezistu. Transmisní mřížky připravit jako kopie do transparentního UV laku.
- 4) Připravené mřížky vyhodnotit kvantitativně (difrakční účinnost) a kvalitativně (planarita a drsnost pracovní hrany, strmost parazitní hrany, zaoblení hran mřížky).

Seznam literatury:

Matějka, F. Praktická elektronová litografie.

Miler, M. Fyzika a holografické difrakční struktury.

Kuittinen, M., et al. Improvements in diffraction efficiency of gratings and microlenses with continuous relief structures.

Hauptmann, M., et al. Determination of proximity effect parameters by means of CD-linearity in sub 100 nm electron beam lithography.

Unal, N., et al. Third dimension of proximity effect correction (PEC).

Krátký, S., et al. PEC Reliability in 3D E-beam DOE Nanopatterning.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. RNDr. Tomáš Šíkola, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá tvorbou vyhlazených asymetrických mřížek s užitím elektronové litografie. Popisuje kompletní postup od přípravy struktur v softwaru, následnou expozici elektronovým litografem až po vyvolání a analyzování kvalitativních i kvantitativních charakteristik vytvořených mřížek. Tyto výsledky jsou následně porovnány s analytickým výpočtem a numerickou simulací.

KLÍČOVÁ SLOVA

ELEKTRONOVÁ LITOGRAFIE, DIFRAKČNÍ OPTICKÉ PRVKY, ASYMETRICKÁ MŘÍŽKA, KOREKCE PROXIMITY EFEKTU.

ABSTRACT

This work deals with fabrication of asymmetric blazed gratings by electron beam lithography. It describes the whole process of structures preparing in software, followed by exposure carried out by an electron beam writer, and it finishes by creating and analysing both qualitative and quantitative characteristics of the fabricated gratings. These results are then compared with analytic calculation and numeric simulation.

KEYWORDS

ELECTRON BEAM LITHOGRAPHY, DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENTS, ASYMMETRIC GRATING, PROXIMITY EFFECT CORRECTION.

BRUNN, O. *Studium asymetrických vyhlazených mřížek vytvořených elektronovou litografií*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 103 s. Vedoucí práce Ing. Stanislav Krátký

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Studium asymetrických vyhlazených mřížek vytvořených elektronovou litografií“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

Poděkování

Děkuji Ing. Stanislavu Krátkému za příkladné a obětavé vedení, podnětné připomínky a cenné rady při zpracování bakalářské práce. Dále děkuji doc. Ing. Vladimíru Kolaříkovi, Ph.D. za možnost zpracovávat tuto práci v týmu Elektronové litografie na Ústavu přístrojové techniky AV ČR, v.v.i. Také děkuji Ing. Petru Meluzínovi a Bc. Štěpánu Černému za jejich pozitivní přístup a udržování dobré nálady na pracovišti. V neposlední řadě děkuji rodičům a přítelkyni za neustálou podporu při studiu.

Ondřej Brunn

OBSAH

1 Úvod	13
2 Elektronová litografie	15
2.1 Interakce elektronového svazku	15
2.1.1 Dopředný rozptyl	16
2.1.2 Laterální rozptyl	18
2.1.3 Sekundární a zpětně odražené elektrony	19
2.1.4 Tepelné jevy	19
2.1.5 Proximity efekt	20
2.1.6 Korekce proximity efektu	23
2.2 Reliéfní elektronová litografie	25
2.2.1 Příprava polovodičové podložky (substrátu)	26
2.2.2 Nanesení rezistu na podložku	26
2.2.3 Sušení a vytvrzení rezistu, následná kontrola	27
2.2.4 Příprava expozičních dat	28
2.2.5 Provedení expozice	28
2.2.6 Vyvolání rezistu	29
3 Asymetrické difrakční mřížky	31
3.1 Reflexní blejzovaná mřížka	31
3.1.1 Reflexní blejzovaná mřížka připravená elektronovou litografií	34
3.2 Transmisní blejzovaná mřížka	35
3.2.1 Transmisní blejzovaná mřížka připravená elektronovou litografií	36
4 Experimentální část	37
4.1 Teoretický výpočet	39
4.2 Simulace v programu GSolver	41
4.3 Testy citlivosti	46
4.4 Příprava expozičních dat	47
4.4.1 Generování mřížek	47
4.4.2 Korekce proximity efektu	49
4.4.3 Přiřazení dávek a export dat	51
4.5 Nastavení litografu a expozice	52
4.6 Vyvolání a příprava vzorků pro měření	52
4.7 Měření	53
4.7.1 Měření difrakční účinnosti	53
4.7.2 Měření řezů mřížek na SEM	56

4.7.3	Měření mřížek na AFM	57
4.8	Vyhodnocení	60
4.8.1	Difrakční účinnost	60
4.8.2	Analýza profilu - planarita funkční hrany	64
4.8.3	Analýza profilu - strmost spádové hrany	66
4.8.4	Analýza profilu - zaoblení u paty blejzu a vrcholu blejzu	68
4.8.5	Drsnost funkční plochy	68
5	Závěr	69
	Seznam použitých zdrojů	71
	Seznam obrázků	75
	Seznam tabulek	79
	Seznam příloh	81
A	Skripty pro generování mřížek	83
A.1	Blejzovaná mřížka - obsahuje pouze jednu šířku úrovně	84
A.2	Blejzovaná mřížka - obsahuje dvě různé šířky úrovně	85
B	Napočítané expoziční dávky	87
B.1	Reflexní mřížky, 1. řád	87
B.2	Transmisní mřížky, 1. řád	89
B.3	Transmisní mřížky, 2. řád	92
C	Měření difrakční účinnosti	95
D	Vyhodnocení - difrakční účinnost	99
D.1	Reflexní mřížky, 1. řád	99
D.2	Transmisní mřížky, 1. řád	102
D.3	Transmisní mřížky, 2. řád	104

1 ÚVOD

V moderním pojetí se za litografické techniky označují metody přenosu obrazových informací na různé druhy podložek. Jako první vznikla optická litografie, též označována jako fotolitografie. Tato metoda je spjata s počátky výroby integrovaných obvodů. S ohledem na rostoucí požadavky na rozlišení byly postupně vyvinuty nové techniky jako rentgenová litografie, elektronová litografie nebo iontová litografie [1, 2].

Jednou z mnoha aplikací elektronové litografie je tvorba difrakčních optických elementů (DOE). Základním stavebním prvkem DOE jsou různé typy difrakčních mřížek. Obecně se jedná o periodické struktury, na kterých díky rozměrům blízcím se vlnové délce dopadajícího světla dochází k difrakci. Základním typem je binární mřížka, která intenzitu dopadajícího světla distribuuje identicky na obě strany od normály dopadu. U asymetrických mřížek záleží rozložení intenzity do jednotlivých řádů na parametrech mřížky. Speciálním typem je tzv. blejzovaná mřížka, která umožňuje umístit intenzitu do libovolného řádu (s výjimkou nultého) [3–5].

Cílem této práce je připravit asymetrické vyhlazené mřížky (blejzované) s využitím elektronové litografie. Nejprve se provedou testy citlivosti, z kterých se získají citlivostní křivky pro výpočet korekcí jevu blízkosti. Dále navrhnout asymetrické vyhlazené mřížky pro reflexivní a transmisní účely. Za použití různých strategií zápisu se provede expozice navržených mřížek. Reflexní mřížky se následně vyhodnotí přímo, transmisní mřížky se připraví jako kopie do UV laku.

Výstupem práce je vyhodnocení mřížek z kvantitativního (difrakční účinnost) a kvalitativního hlediska (planarita a drsnost funkční hrany, sklon spádové hrany a zaoblení hran mřížky u paty a dna blejzu). Kvalitativní vlastnosti jsou vyhodnoceny měřením na mikroskopu atomárních sil (AFM) a rastrovacím elektronovém mikroskopu (SEM). U difrakční účinnosti je provedeno porovnání s analytickým výpočtem a numerickou simulací.

2 ELEKTRONOVÁ LITOGRAFIE

Elektronová litografie je technika používaná k vytváření velmi malých a současně přesně definovaných struktur [2]. Základním principem jsou netermické interakce elektronového svazku s vhodně zvolenou vrstvou - elektronovým rezistem. Při průchodu elektronů vrstvou rezistu dochází ke kolizím s molekulami či atomy vrstvy. Během kolizí dochází k předání energie elektronů do molekul rezistivní vrstvy, což vede k lokální změně chemicko-fyzikálních vlastností. Tímto způsobem dochází k zapsání latentního (skrytého) obrazu, který je nutné následně vyvolat [1].

Výhodou elektronové litografie je možnost přímého zápisu, není tedy nutné používat masku jako např. u fotolitografie. Další výhodou je snadné řízení zápisu v softwarovém prostředí a rozlišení v řádu jednotek nm [6]. Nevýhodou této metody je časová náročnost zápisu (především u složitějších struktur), rozptyl elektronů v látce a jev blízkosti (proximity efekt) [1, 7].

Kvalita a rozlišení výsledných struktur není ovlivněna pouze parametry elektronového litografu (urychlovací napětí, velikost svazku, rozlišení apod.). Svůj vliv má také typ použitého rezistu a následný proces vyvolání (použitá vývojka). V této práci bude pozornost věnována tzv. reliéfní elektronové litografii. Výsledný motiv se vytváří v rámci rezistivní vrstvy. Metoda se používá především k výzkumným účelům při testování vlastností rezistů nebo při kalibraci elektronových litografií. Její praktické uplatnění spočívá v tvorbě tzv. *masterů*, což jsou šablony např. pro tisk holografických ochranných známek. V případě, že cílem je získat obraz v polovodičové podložce nebo její funkční vrstvě, hovoříme o binární elektronové litografii [8, 9].

2.1 Interakce elektronového svazku

Výše bylo uvedeno, že zapsání motivu do rezistu probíhá prostřednictvím interakcí elektronového svazku s atomy a molekulami této vrstvy, při kterých dochází k předání energie do materiálu. Existuje několik mechanismů těchto interakcí - emise brzdného elektromagnetického záření, elastické a neelastické srážky. Převažující mechanismus záleží především na energii záření, menší měrou je určujícím faktorem také druh ozařovaného materiálu. Při velkých energiích (10 MeV a větší) převažuje ztráta energie zářením, při menších neelastické srážky. Při malých energiích má svůj význam také elastický rozptyl elektronů, kdy dochází ke změně směru pohybu částice a předání (ve srovnání s neelastickým rozptylem) malého množství energie. Pokud je energie svazku menší než 100 keV, je možné vliv ztráty energie zářením zanedbat [10]. Litograf VISTEC EBPG5000+ES, který bude použit pro expozici struktur v této práci, umožňuje použít elektronový svazek o energii 50 nebo 100

keV. Vliv emise energie zářením lze tedy zanedbat a hlavním interakční mechanismem budou neelastické a elastické kolize elektronů [10].

Vlivem těchto interakcí dochází při průchodu elektronů materiálem k jejich rozptylu do všech směrů, a tedy nejen ve směru dopadajícího svazku. Rozptylové mechanismy tedy ovlivňují výslednou kvalitu expozice a především při rozměrech menších než 1 μm , je nutné zvážit a případně korigovat jejich vliv (více v 2.1.6). Mezi rozptylové mechanismy patří dopředný a laterální rozptyl elektronů, sekundární a zpětně odražené elektrony a vliv tepelných jevů. Míra vlivu těchto mechanismů záleží na energii primárního svazku, povaze použitého materiálu (rezistu i podložky) a penetrační hloubce [1, 10]

2.1.1 Dopředný rozptyl

Dopředný rozptyl elektronů v látce je popisován hustotou absorbované energie E_a jako funkce penetrační hloubky z . Maximální dosaženou hloubku lze vypočítat pomocí doletu elektronů při kolmém dopadu (tzv. Grünův rozptyl) R_g jako [1]:

$$R_g = \frac{0,046E_0^{1,75}}{\rho}; \quad (2.1)$$

R_g – dolet elektronů [μm],

ρ – hustota materiálu [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$],

E_0 – primární energie elektronů [keV].

Hustota absorbované energie E_a je pak dána vztahem [1]:

$$E_a = \frac{QE_0}{eR_g} \lambda(f); \quad (2.2)$$

E_a – hustota absorbované energie [$\text{eV}\cdot\text{cm}^{-3}$],

Q – dávka ozáření (expoziční dávka) [$\text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$],

E_0 – primární energie elektronů [keV],

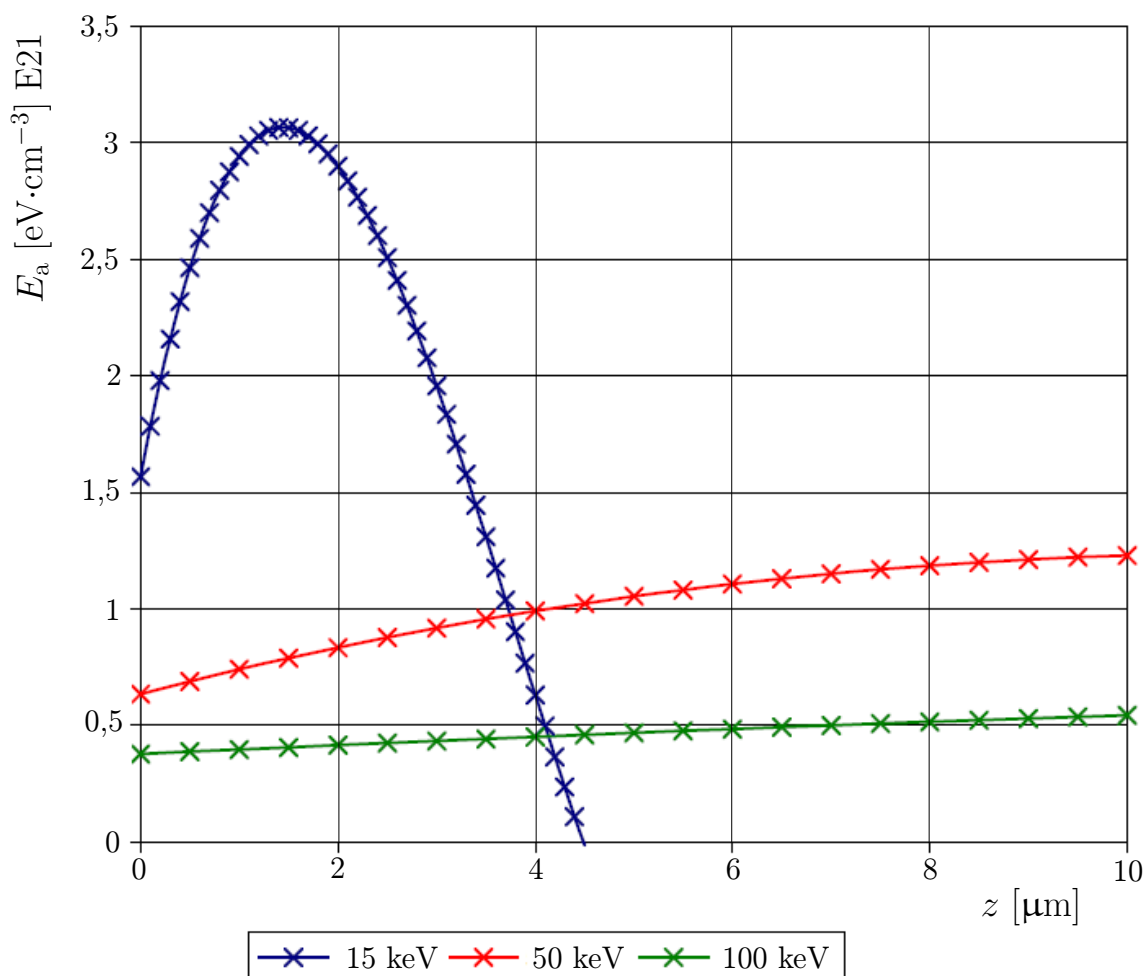
e – elementární náboj elektronu [C],

R_g – dolet elektronů v látce [cm],

$\lambda(f)$ – funkce hloubka/dávka vyjádřená pomocí normalizovaného průniku $f = z \cdot R_g^{-1}$ v polynomické formě [1]:

$$\lambda(f) = 3,5f^3 - 8,9f^2 + 4,7f + 0,74. \quad (2.3)$$

Obr. 2.1 znázorňuje změnu hustoty absorbované energie v závislosti na penetrační hloubce pro různé energie primárních elektronů. Představu o maximální penetrační hloubce (doletu elektronů) v závislosti na primární energii v různých materiálech poskytuje tab. 2.1.



Obr. 2.1: Závislost hustoty absorbované energie E_a na penetrační hloubce z v elektronovém rezistu PMMA (polymethylmethakrylát) při expoziční dávce $10 \mu\text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$ pro tři různé energie primárních elektronů, převzato z [3, s. 21].

Tab. 2.1: Dolet elektronů v materiálech pro odlišné energie primárních elektronů [1, s. 5]

R_g [μm]	PMMA	Si	Ag	Au	Pt
6 keV	0,882	0,414	0,100	0,054	0,049
15 keV	4,380	2,060	0,501	0,272	0,245
50 keV	36,040	16,960	4,119	2,241	2,014
100 keV	121,220	57,040	13,850	7,537	6,775

Praktický význam těchto dvou veličin lze demonstrovat na příkladu zápisu do PMMA litografem s energií svazku 15 keV. V takovém případě lze využít vrstvu do tloušťky cca $2,2 \mu\text{m}$ (polovina R_g), nejlépe však pouze do tloušťky $1,5 \mu\text{m}$ (pro tuto hodnotu dosahuje E_a svého maxima) [1].

2.1.2 Laterální rozptyl

Z hlediska výsledného rozlišení motivu má podstatný vliv laterální (boční) rozptyl elektronů. Matematicky přesný popis tohoto jevu při souběhu s dopředným rozptylem zatím nebyl podán. Do jisté míry jsou jej schopny nahradit simulace drah elektronů prováděných metodou Monte Carlo. Laterální rozptyl elektronů však lze popsat pomocí efektivního poloměru svazku elektronů v dané penetrační hloubce, značí se σ . Pro PMMA je tato veličina definována vztahem [1]:

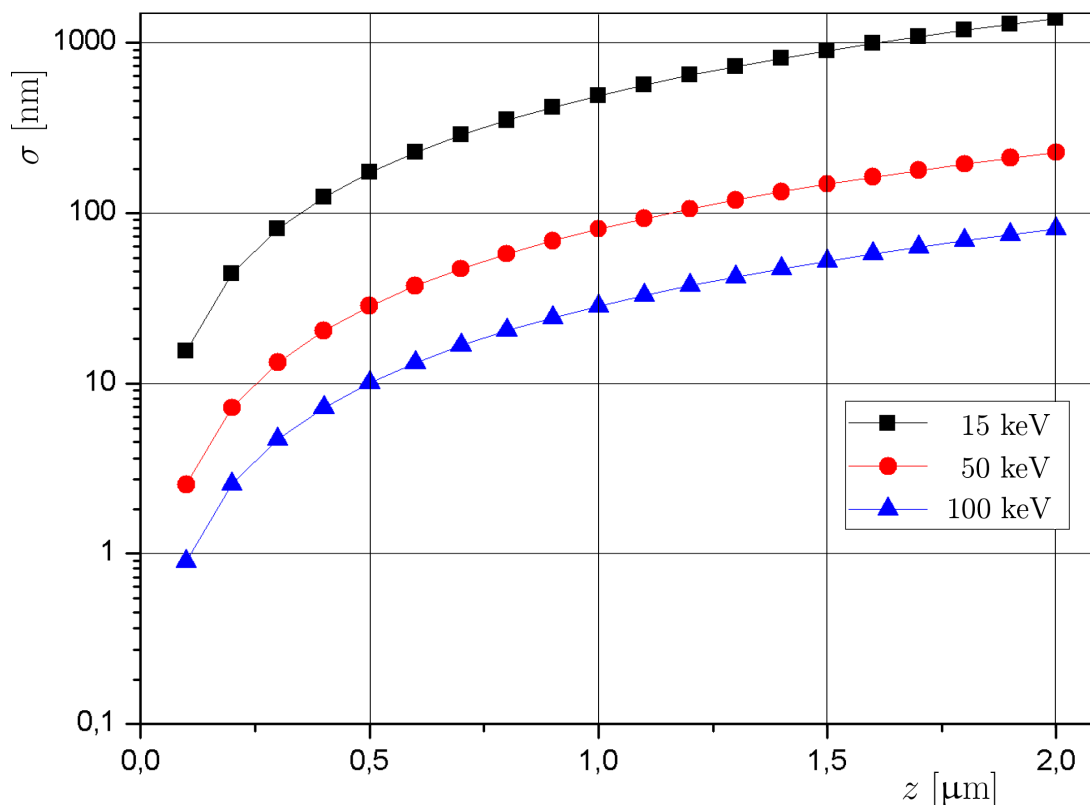
$$\sigma = 0,9 \cdot \left(\frac{z}{E_0} \right)^{1,5}; \quad (2.4)$$

σ – efektivní poloměr svazku elektronů v dané penetrační hloubce [nm],

z – penetrační hloubka [nm],

E_0 – primární energie elektronů [keV].

Závislost σ na penetrační hloubce z je zachycena na obr. 2.2.



Obr. 2.2: Závislost veličiny σ popisující boční rozptyl elektronů na penetrační hloubce pro různé energie primárních elektronů, podle [1, s. 7]

2.1.3 Sekundární a zpětně odražené elektrony

Následkem interakcí primárních elektronů s rezistem a podložkou dochází ke vzniku sekundárních a zpětně odražených elektronů. Velká část energie primárních elektronů je předána mechanismem emise sekundárních („pomalých“) elektronů, které interagují s molekulami rezistové vrstvy a právě jejich vlivem dochází ke změně vlastností rezistu (jeho expozici). Výtěžek sekundárních elektronů závisí na materiálu a úhlu dopadu primárního elektronového svazku [11]. Sekundární elektrony mají relativně malou energii (2 - 50 eV), jejich dolet se pohybuje v řádu nanometrů. Z toho důvodu nemají prakticky vliv na výsledné rozlišení motivu [1].

Naopak energie zpětně odražených elektronů je srovnatelná s energií primárních elektronů. Srovnatelný je také dolet zpětně odražených a primárních elektronů. Z těchto důvodů se zpětně odražené elektrony významně podílejí na výsledné expozici motivu v rezistu (především na jeho rozlišení). Množství zpětně odražených elektronů závisí na materiálu podložky [1, 11]. S narůstajícím protonovým číslem z se zvětšuje množství zpětně odražených elektronů. Např. pro křemíkový substrát ($z = 14$) je koeficient zpětně odražených elektronů $\eta = 0,4$. [1]. Protonová čísla jiných materiálů používaných v elektronové litografii jsou pro srovnání uvedena v tab. 2.2.

Tab. 2.2: Materiálové vlastnosti látek, částečně převzato z [1, s. 9].

Materiál	z	ρ [g·cm ⁻³]	c [J·kg ⁻¹ · K ⁻¹]	[W·m ⁻¹ · K ⁻¹]
Si	14	2,33	678,0	118,00
Ag	79	10,50	395,9	453,00
Au	47	19,30	240,1	310,00
Pt	78	21,47	234,0	70,30

Materiál	ρ [g·cm ⁻³]	c [J·kg ⁻¹ · K ⁻¹]	[W·m ⁻¹ · K ⁻¹]
PMMA	1,20	1500,0	0,20
Sklo	2,20	728,0	1,40

2.1.4 Tepelné jevy

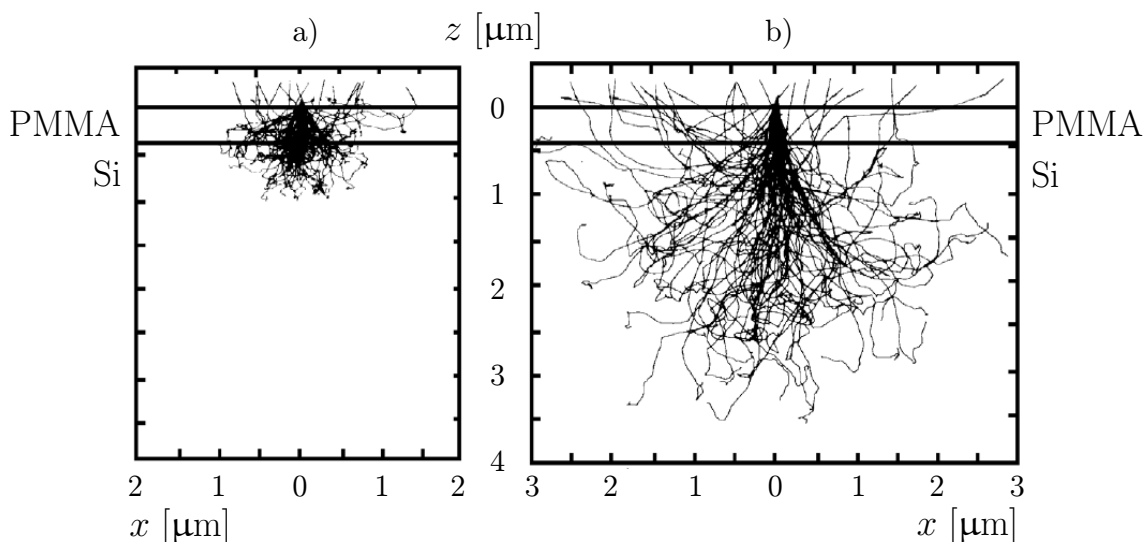
Během předávání energie při kolizích elektronů dochází k uvolňování tepla. V elektronové litografii se expozice provádí ozařováním předem definovaných míst (za pomoci tzv. razítek, které se případně skládají vedle sebe a pokryjí požadovanou plochu) během určitého časového intervalu (závisí na expoziční dávce). Vznikající teplo může zapříčinit nepřipustný nárůst teploty rezistu a následně i podložky. Proto je

pro každou kombinaci rezist-podložka stanovena mezní dávka a mezní čas ozáření. To umožní odvedení tepla, které by jinak ovlivnilo expozici sousedních razítek [3].

Nejvýhodnější tedy budou podložky, které mají vysokou tepelnou vodivost. Křemíkové substráty této podmínce velmi dobře vyhovují (současně také vyhovují svým nízkým protonovým číslem - nižší koeficient zpětně odražených elektronů). V tab. 2.2 jsou uvedeny materiálové vlastnosti látek, které jsou využívány při litografických procesech.

2.1.5 Proximity efekt

Výše byly popsány různé rozptylové mechanismy. Šíření elektronů v systému rezist-substrát je znázorněno na obr. 2.3.



Obr. 2.3: Simulované trajektorie elektronů vycházejících z bodového zdroje pro energie a) 10 keV, b) 20 keV; převzato (graficky upraveno) z [12].

Vliv rozptylových mechanismů na výsledný obraz v rezistu konkrétní tloušťky na určité podložce se souhrnně označuje jako proximity efekt. Do češtiny se tento pojem překládá jako „jev blízkosti“, což vystihuje jeho podstatu. V praxi se jedná o exponování objemu rezistu mimo místa, kde dopadl svazek primárních elektronů (tedy v jeho blízkém okolí). Matematicky lze tento jev charakterizovat rozptylovou funkcí (PSF), která vyjadřuje rozložení hustoty absorbované energie na vzdálenosti r od místa dopadu bodového svazku [9].

PSF funkci je možné aproximovat jako dvojitou Gaussovu funkci [7, 9, 13]:

$$f(r) = \frac{1}{\pi(1+\eta)} \left[\frac{1}{\alpha^2} \exp\left(-\frac{r^2}{\alpha^2}\right) + \frac{\eta}{\beta^2} \exp\left(-\frac{r^2}{\beta^2}\right) \right] \text{ pro} \quad (2.5)$$

$$\int_0^\infty 2\pi \cdot f(r) \cdot r \cdot dr = 1;$$

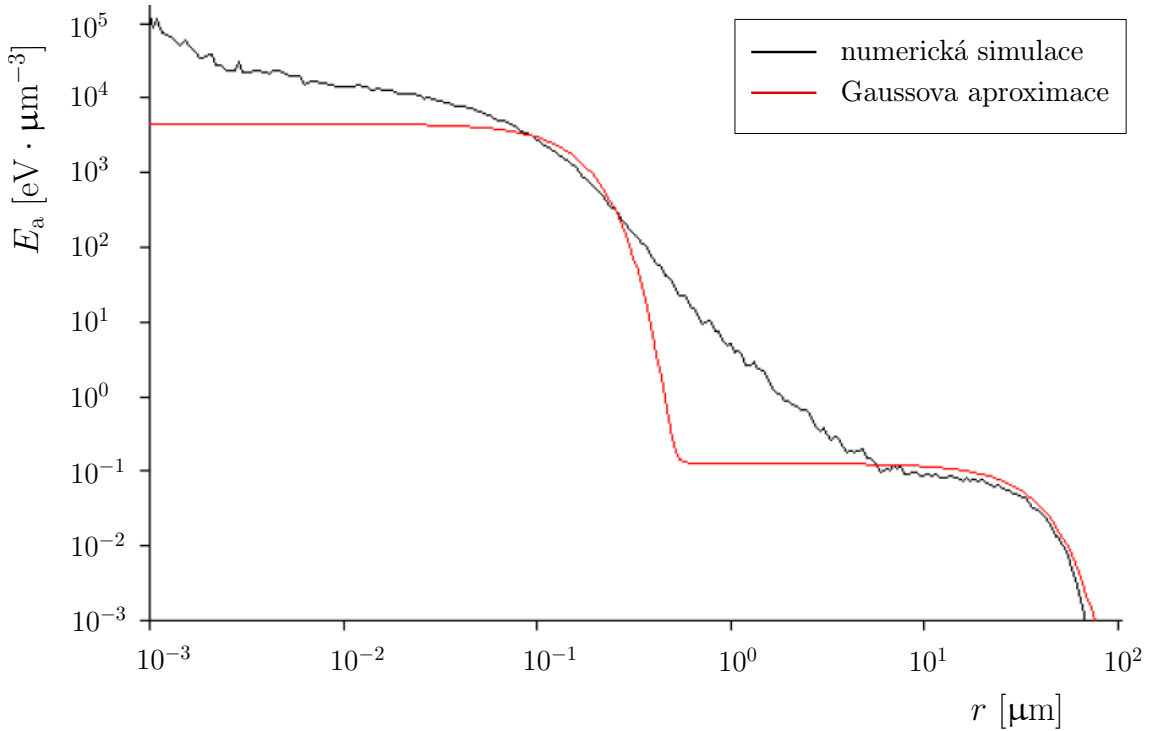
α – koeficient charakterizující laterální rozptyl elektronů při jejich dopředném rozptylu [μm],

β – koeficient charakterizující dolet zpětně odražených elektronů [μm],

η – koeficient charakterizující poměr mezi energií zpětně odražených a primárních elektronů [-],

Pozn.: typické hodnoty pro tyto koeficienty jsou uvedeny v tab. 2.3.

Numerický model PSF funkce a její aproximace dvojitou Gaussovou funkcí je zachycen na obr. 2.4. Numerický model, který se získává Monte Carlo simulacemi, je následně aproximován funkcí dle rov. 2.5, čímž se získají koeficienty α , β a η .



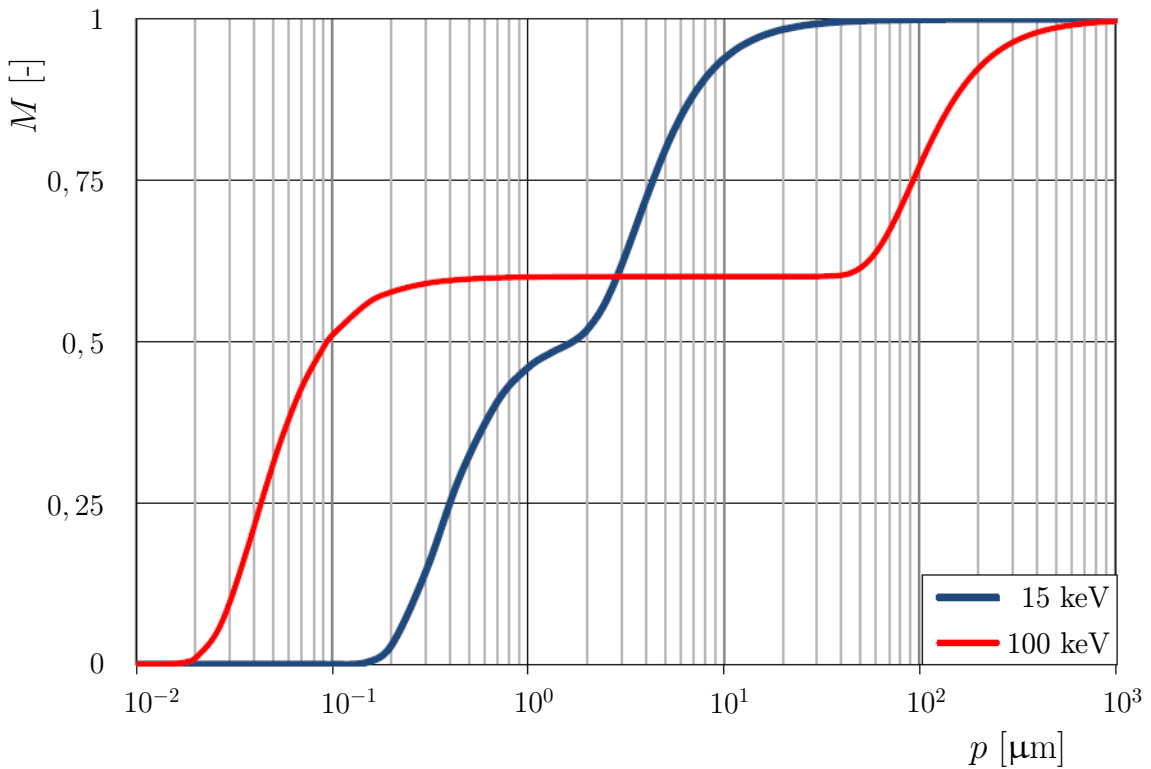
Obr. 2.4: Numerický model PSF funkce a její Gaussova aproximace, převzato (graficky upraveno) z [14, s. 19]

„Zatím nejvýstižnějším modelem kvantifikace a charakteru proximity efektu je model využívající tzv. modulační přenosovou funkci MTF.“ [1] Tuto funkci v normovaném tvaru lze získat Fourierovou transformací rov. 2.5 [1, 9]:

$$M = \frac{a}{1 + \eta} \left[\exp \left(-\frac{\pi^2 \alpha^2}{p^2} \right) + \eta \exp \left(-\frac{\pi^2 \beta^2}{p^2} \right) \right]; \quad (2.6)$$

p – perioda exponovaných čar [μm],

α, β, η – stejné jako v rov. 2.5. Typické hodnoty v tab. 2.3.



Obr. 2.5: Modulační přenosová funkce v závislosti na periodě exponovaných čar v rezistu PMMA tloušťky 500 nm pro různé energie primárních elektronů, převzato (graficky upraveno) z [9, s. 7]

Hodnoty MTF funkce (viz obr. 2.5) lze interpretovat jako procentuální rozdíl dávky v exponované a neexponované oblasti. V ideálním případě platí $M = 1$. Vlivem rozptylových mechanismů však dochází k tomu, že $M < 1$, je závislá na periodě p (resp. rozměru exponované struktury) a je tedy nutné provést korekci proximity efektu.

Tab. 2.3: Rozptylové koeficienty pro různé energie primárních elektronů při tloušťce rezistu 500 nm na křemíkovém substrátu. Hodnoty koeficientů β a η pro energie 20 - 100 keV získány experimentálně, ostatní extrapolací. Hodnoty koeficientu α jsou vypočtené. Hodnoty pro $E_a = 15 \text{ keV}$ jsou převzaty z [1], ostatní z [15]. Značení sjednoceno podle [1].

E_a [keV]	α [μm]	β [μm]	η [-]
5	1,330	0,18	0,74
10	0,390	0,60	0,74
15	0,200	1,20	0,74
20	0,120	2,00	0,74
50	0,024	9,50	0,74
100	0,007	31,20	0,74

Tab. 2.3 ukazuje, že hodnoty koeficientů α a β jsou závislé na energii primárních elektronů - viz rov. 2.1, 2.2 a 2.4. Koeficient α s rostoucí primární energií elektronů klesá - vyšší energie svazku zaručuje lepší směrovost elektronů v látce. Naopak koeficient β roste - vyšší energie svazku má za následek větší dolet zpětně odražených elektronů. Koeficient η závisí pouze na materiálu substrátu. Hodnoty koeficientů je možné také získat Monte Carlo simulacemi, srovnání hodnot z literatury a výsledků simulací z dvou programů je uvedeno v [9, s. 5, tab. 2.2].

2.1.6 Korekce proximity efektu

Korekce proximity efektu (PEC) je v zásadě možná třemi způsoby - korekce expoziční dávky, korekce exponovaného tvaru nebo prostřednictvím inverzní expozice okolí [16].

Korekce prostřednictvím inverzní expozice okolí požadovaného motivu (označováno také jako pozadí) probíhá tak, že se provede druhá expozice, při které je pozadí exponováno konstantní expoziční dávkou. Výhodou této metody je její jednoduchost a možnost použití prakticky jakéhokoliv elektronového litografu. Nevýhody této metody však silněji převažují. Nevýhodami jsou ztráta kontrastu při vyvolání a pouze neúplná korekce (část proximity efektu závislá na koeficientu α není korigována) [16]. Z toho důvodu není tato metoda použitelná pro přesné PEC aplikace.

Při korekci exponovaného tvaru je v celé ploše tvaru použita stejná dávka. Poměrně dobře čitelný postup tvarové korekce je metoda PYRAMID popsaná v [17]. Při této metodě se nejdříve rozdělí motiv na pravoúhlé tvary¹. Následně dojde k dvou-

¹Metoda byla navržena pro přesné exponování šablon pro integrované obvody. Proto je rozdělení na pravoúhle objekty dobře aplikovatelné.

úrovňovému posouzení tvarové korekce. Nejprve se uvažuje daný objekt bez okolních expozic (lokálně) a následně dojde k posouzení nutnosti korekce s ohledem na sousední části exponovaného motivu (globálně). Tato metoda může být provedena bez časově náročných výpočtů a simulací (jako u korekce dávek). Nevýhodou oproti ostatním metodám je nižší flexibilita, experimentální náročnost (nutnost určení parametrů např. dw a dh) [16] a použitelnost pouze pro binární litografii. Metoda je tedy spíše aplikovatelná pro optimalizování určité expozice, která bude následně replikována (stejný tvar, stejná hloubka apod.).

Korigováním proximity efektu prováděným prostřednictvím korekce expoziční dávky lze dosáhnout velmi kvalitního potlačení tohoto jevu [16]. V ideálním případě se pro každý exponovaný pixel spočítá korigovaná expoziční dávka. Takový algoritmus by byl výpočetně i expozičně velmi časově náročný. Reálně se tedy dávka počítá pro nějaké obecnější části motivu, např. pro jednotlivé vrstvy u víceúrovňových struktur [7, 16].

V případě binární litografie je ošetření proximity efektu poměrně snadné a dá se popsat prostřednictvím rovnice [9]:

$$D = \frac{1 + \eta}{1 + 2L\eta}; \quad (2.7)$$

D – násobek kritické expoziční dávky (dávka, kdy je následně rezist vyvolán v plném rozsahu tloušťky - tzv. do dna),

η – stejný význam jako v rov. 2.5,

L – faktor zaplnění motivu (osamocená linka $L = 0$, mřížka se střídou 1:1 $L = 0,5$, vyplněná plocha $L = 1$).

Korekce proximity efektu u reliéfní litografie je značně složitější. Pro účely přípravy expozičních dat (tedy i pro výpočet korekcí proximity efektu) bude v této práci využit program BEAMER GenISys. Nejprve je nutné provést simulace pro získání PSF funkce (viz rov. 2.5 a obr. 2.4). V zásadě je pak možné postupovat dvěma způsoby, jak vypočítat korigované expoziční dávky. První variantou je přímé využití PSF numerického modelu, druhou variantou je aproximace dvojitou Gaussovou funkcí (obráz. 2.4). Předchozí práce ukázala, že přesnější výsledky podává využití Gaussovy aproximace, a že je nutné navrhnout celoplošně exponované struktury (první vrstva je exponována, vzniká zapuštění motivu) [7].

Výpočet korekce proximity efektu se řídí modelem [18]:

$$E_x = D_x \otimes \frac{1 + \eta g_\beta}{1 + \eta}; \quad (2.8)$$

E_x – absorbované energie,

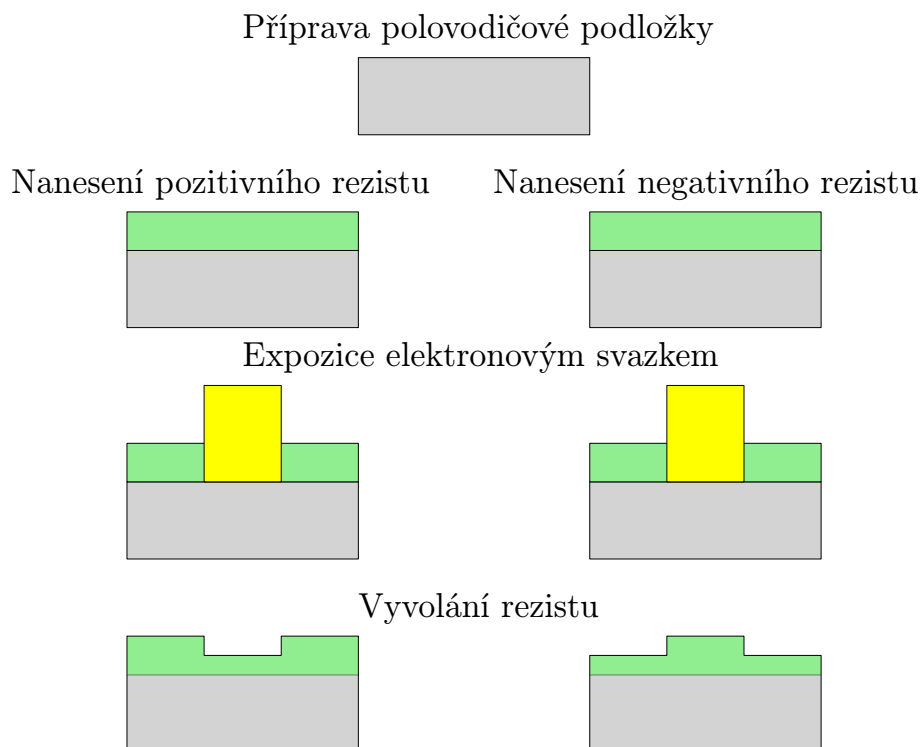
D_x – expoziční dávka,

g_β – Gaussova funkce zpětně odražených elektronů.

2.2 Reliéfní elektronová litografie

Samotný technologický postup této metody (obr. 2.6) lze rozdělit do následujících kroků [3, 8]:

1. příprava polovodičové podložky (substrátu),
2. nanesení rezistu na podložku (odstředivé lití apod.),
3. sušení a vytvrzení rezistu, následná kontrola (homogenita, hloubka, nečistoty),
4. příprava expozičních dat v softwaru včetně výpočtu korekcí proximity efektu,
5. provedení expozice za použití elektronového litografu,
6. vyvolání obrazu v rezistu.



Obr. 2.6: Schéma zápisu motivu do pozitivního a negativního rezistu

2.2.1 Příprava polovodičové podložky (substrátu)

Polovodičová podložka musí být nejprve důkladně očištěna od veškerých nečistot (prachové částice, organické látky, voda). Tento předpoklad je nutný pro dobré přilnutí rezistu. Při volbě čistícího procesu je nutné zvážit, zda-li bude rezist nanášen přímo na čistý polovodič nebo na polovodič s přítomnou funkční vrstvou (např. oxid křemíku apod.) [3].

Odstranění nečistot (převážně prachových částic) z povrchu není snadné. Je nutné zvolit dostatečně razantní proces, který však bude současně šetrný vůči substrátu a především jeho funkčním vrstvám. Následující postup je použitelný i pro substrát s funkční vrstvou oxidu křemíku nebo nitridu křemičitého. Povrch podložky se omyje deionizovanou vodou se saponátem za mechanického působení molitanového štětečku nebo nylonového kartáčku. Během tohoto procesu je podložka upnuta v odstředivce (tzv. *spin coateru*). Během odstřeďování se povrch substrátu opláchne deionizovanou vodou. Následně se zvýší otáčky a povrch podložky se ofoukne čistým bezprašným plynem (nejčastěji se používá dusík), čímž se povrch vysuší od deionizované vody. V případě potřeby je možné zahrnout do procesu dočištění substrátu působením kyslíkové plazmy [1, 3].

2.2.2 Nanesení rezistu na podložku

Je-li podložka dostatečně očištěna je možné přistoupit k nanesení elektronového rezistu na její povrch. Výběr rezistu ovlivňuje proces nanášení. Nejpoužívanější metodou pro vytvoření tenké vrstvy rezistu na substrátech je technika odstředivého lití. Nejprve se substrát podtlakem zafixuje v odstředivce. Následně se injekční stříkačkou s filtrem nanese roztok rezistu ve vhodném rozpouštědle na substrát. Poté se přistoupí k samotnému odstředění. Odstřeďováním při konstantních otáčkách dojde k rozprostření rezistu po celé ploše substrátu. Podmínkou je dostatečně dlouhá doba odstřeďování. Vztah pro výslednou tloušťku rezistu v závislosti na koncentraci výchozího roztoku a frekvenci otáček lze vyjádřit rovnicí [1]:

$$w = \frac{k_{\eta} c^2}{\sqrt{\omega}}; \quad (2.9)$$

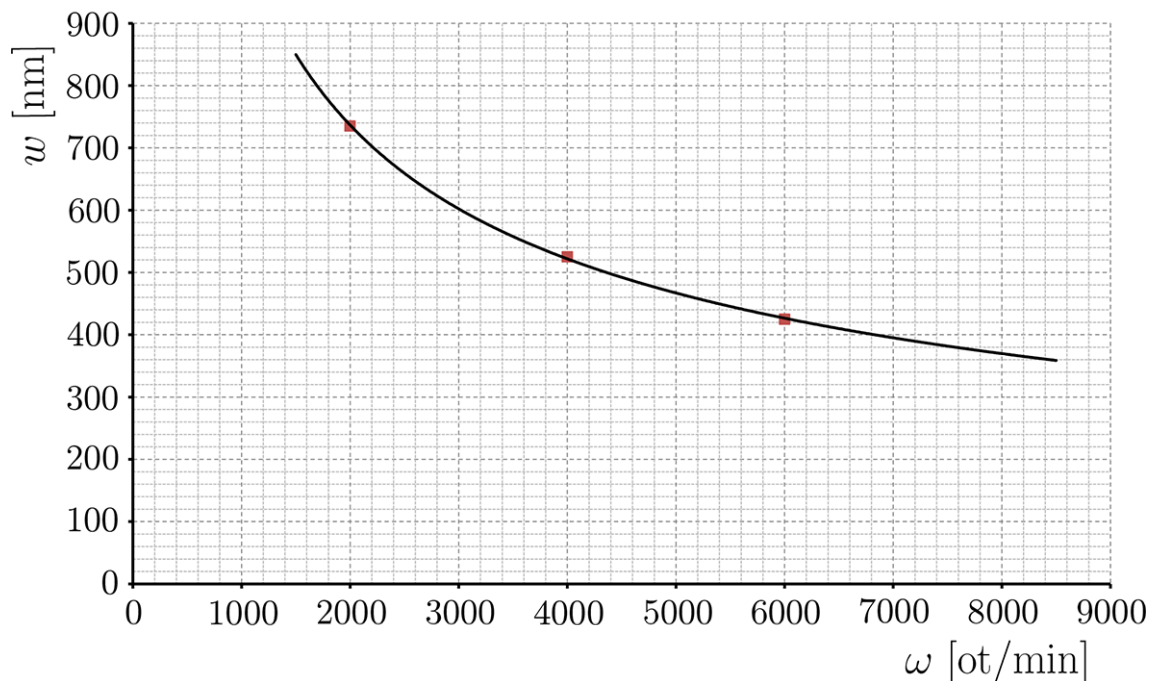
w – výsledná tloušťka rezistu [nm],

k_{η} – konstanta zahrnující viskózní vlastnosti roztoku a také parametry odstředivky,

c – koncentrace roztoku [hmotnostní %],

ω – frekvence otáček [ot/min].

Ke komerčně dostupným rezistům výrobci poskytují údaje o viskozitě roztoku a nanášecí křivku (závislost tloušťky na frekvenci otáček). Nanášecí křivka (obr. 2.7)



Obr. 2.7: Nanášecí křivka elektronového rezistu PMMA 495K A8. Převzato (upraveno) z [19].

pak slouží pro stanovení parametrů nanášení pro získání vrstvy požadované tloušťky.

Běžně se užívá frekvence otáček v rozsahu 1500 - 8000 rpm. Frekvence menší než 1500 rpm nejsou vhodné, protože dochází ke zvětšení tloušťky rezistu na okrajích substrátu [1].

Nanášení rezistu je velice choulostivá operace, kterou je nutno provádět v co nejvíce bezprašném prostředí. V praxi se tedy odstředivky umísťují do laminárních boxů. Přítomnost prachových částic může způsobit nehomogenitu rezistu, což může vést ke zhoršení kvality výsledného motivu, v krajním případě k nepoužitelnosti rezistu [3].

2.2.3 Sušení a vytvrzení rezistu, následná kontrola

Dalším krokem přípravy substrátu s rezistem před exponováním je sušení. Při tomto procesu dochází k odpaření rozpouštědla z rezistu a vytvoření definované amorfnní struktury (vytvrzení rezistu). Obecně by teplota při sušení měla být vyšší než je teplota skelného přechodu T_g rezistu (např. teplota skelného přechodu PMMA je $T_g = 125$ °C). Současně by však měla být menší než teplota termické degradace T_c (pro PMMA je $T_c = 250$ °C) [1]. Standardně je teplota sušení doporučena výrobcem rezistu.

Sušení lze v zásadě provádět dvěma způsoby - na vyhřáté podložce a v horkovzdušné sušárně. Výhodnější je použití vyhřáté podložky, protože zde je teplo dodáváno skrze substrát zespodu, což vede k rychlejšímu odpaření rozpouštědla a vysušení rezistu [3].

Po sušení se provádí kontrola kvality rezistu. Dokonalá tenká vrstva rezistu se při pozorování jeví jako opticky homogenní plocha. V závislosti na tloušťce a indexu lomu se projevuje určitou interferenční barvou. Při kontrole ověřujeme, zda-li není tento stav narušen defekty (oblasti nepokryté rezistem, poruchy způsobené mikrogelem apod.) nebo heterogenními částicemi (prachové částice) [1].

Dále se s ohledem na následné použití rezistu provádí měření tloušťky rezistu. Na okraji substrátu se udělá vryp, který se následně změří na profilometru [20].

2.2.4 Příprava expozičních dat

Expoziční data se připravují v k tomu určených programech. Nejprve je potřeba nadefinovat, co má být exponováno. V zásadě se uplatňují dva přístupy - přímý návrh a maskování motivu.

Přímo se navrhují jednoduché opakující se struktury (např. difrakční mřížky). Tyto struktury se skládají z různých elementárních geometrických tvarů - převážně obdélníků a čtverců. Je tedy poměrně jednoduché je navrhnout. Maskování motivu se používá pro složitější struktury s obecným tvarem nebo soustavy různých motivů (komplexnější DOE) [20].

Dalším krokem je přiřazení expozičních dávek jednotlivým částem struktury. Při vytváření binárních struktur se jedné poměrně o snadnou záležitost. Oblastem s navrženou strukturou se přiřadí požadovaná dávka (podle křivky citlivosti a PEC - viz 2.1.6), okolí exponováno není. V případě víceúrovňových struktur se různým částem motivu přiřazují různé dávky tak, aby se pro každou část dosáhlo požadované hloubky.

Posledním krokem je vyexportování expozičních dat do souboru, který se následně nahraje do softwaru pro řízení expozice. Případně se provádí optimalizace nastavení expozice pro jednotlivé části struktury (např. použitý proud ve svazku).

2.2.5 Provedení expozice

Nejprve se do elektronového litografu založí dříve připravený substrát s naneseným rezistem. Proveďte se nastavené litografu - mapování povrchu substrátu, kalibrace expozičních polí, nastavení proudu ve svazku atd. Následně se spustí samotná expozice, která je řízená programem podle předem připravených expozičních dat. Jedné

se o plně automatický proces, do kterého není nutné zasahovat. Po skončení expozice lze vzorek vyjmout a pokračovat jeho vyvoláním.

2.2.6 Vyvolání rezistu

Již výše bylo řečeno, že expozicí elektronovým litografem vzniká latentní obraz, který je nutno vyvolat. Až po vyvolání vzniká fyzický motiv. V případě binární litografie se vytvoří místa s rezistem a bez rezistu, v případě reliéfní litografie místa s různou tloušťkou rezistu. Obecně se jedné o rozpuštění určitých částí rezistu ve vhodném rozpouštědle (předsáno výrobcem použitého rezistu). Rozpouštědla používaná v tomto procesu se označují jako vývojky [1].

Výsledné vlastnosti finálního obrazu ovlivňuje celá řada faktorů - teplota vzduchu, teplota vývojky, doba vyvolání, tloušťka vrstvy, způsob vyvolání (ponoření, sprejování, míchání) apod. [3].

Po uplynutí doby vyvolání následuje odstranění vývojky ze vzorku způsobem, který je vhodný pro daný výrobní proces (ofouknutí, odstranění vývojky v odstředivce apod.) [3].

3 ASYMETRICKÉ DIFRAKČNÍ MŘÍŽKY

Zástupcem mřížek s asymetrickým profilem je mřížka blejzovaná. Tyto mřížky mají široký aplikační potenciál. Uplatňují se např. v monochromátorech a jiných spektrálních přístrojích (zejména pro UV část spektra), které používají světelné zdroje s malou účinností, popř. detektory s nízkou citlivostí, a nevyžadují při rozkladu světla velkou úhlovou disperzi. Mřížky tedy mohou mít malou hustotu čar a přitom je třeba, aby měly vysokou difrakční účinnost. Jediným možným řešením v tomto případě je použití asymetrického blejzovaného profilu [21].

U všech typů difrakčních mřížek ovlivňují výsledné vlastnosti jejich parametry. U asymetrických blejzovaných difrakčních mřížek je správné naladění parametrů klíčové. Pouze v takovém případě můžeme dosáhnout toho, že veškerá intenzita může být difraktována do požadovaného řádu (difrakční účinnost bude pro tento řád maximální). Difrakční účinnost m -tého řádu se obecně vyjadřuje jako poměr intenzity záření difraktovaného v m -tém řádu k intenzitě dopadajícího záření [21]:

$$\eta_m = \frac{I_{d,m}}{I_0}; \quad (3.1)$$

η_m – difrakční účinnost m -tého řádu [-],

$I_{d,m}$ – intenzita difraktovaného záření v m -tém řádu [lx],

I_0 – intenzita dopadajícího záření [lx].

S ohledem na rozdílné vlastnosti budeme následně odlišovat reflexní (tzv. „na odraz“) a transmisní (tzv. „na průchod“) blejzované mřížky. Liší se také použité materiály. Pro reflexní mřížky se používají materiály s vysokou odrazivostí (typově kovy - např. stříbro), většinou se jedná o tenké vrstvy nanesené na povrchu mřížek. Pro transmisní mřížky se používají různé druhy UV laků a skel, požadavkem je zde vysoká propustnost a nízká odrazivost záření.

3.1 Reflexní blejzovaná mřížka

Účinnost jednotlivých řádů této mřížky (geometrie viz obr. 3.1) pak můžeme vyjádřit dle vztahu [21]¹:

$$\eta_{r,m} = \text{sinc}^2 \left\{ \pi \left[\left(\frac{\Lambda}{\lambda} \right) (\cos \Theta_i + \cos \Theta_m) \left(\frac{h}{\Lambda} \right) - m \right] \right\}; \quad (3.2)$$

$\eta_{r,m}$ – účinnost m -tého difrakčního řádu pro reflexní blejzovanou mřížku [-],

m – difrakční řád [-],

¹Vztah byl upraven tak, aby reprezentoval geometrii (viz obr. 3.1) exponovaných mřížek v této práci. Zlomek h/Λ nahrazuje $\text{tg} \alpha$ pro lepší znázornění závislosti $\eta_{r,m}$ na hloubce h .

Λ – perioda mřížky [nm],

λ – vlnová délka světla [nm],

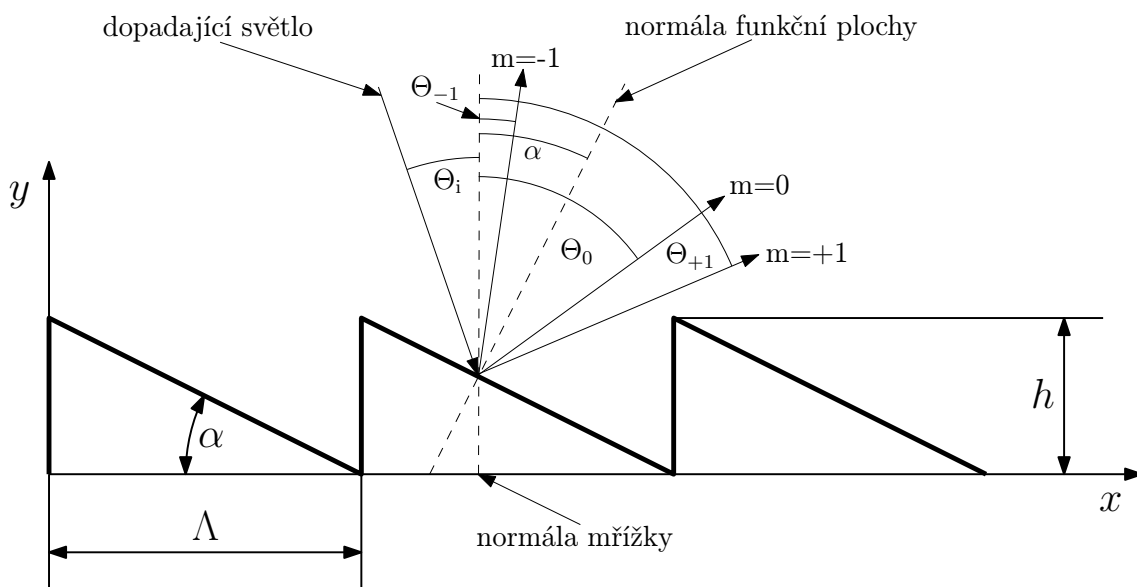
h – výška blejzované mřížky [nm],

α – sklon funkční plochy [rad],

Θ_i – úhel dopadu [rad],

Θ_m – úhel odrazu m -tého difrakčního řádu – lze vyjádřit z mřížkové rovnice:

$$\Theta_m = \arccos \left[1 - \left(\frac{m\lambda}{\Lambda} - \sin(\Theta_i - \alpha) \right)^2 \right]^{0,5} + \alpha \quad (3.3)$$



Obr. 3.1: Ideální profil reflexní blejzované mřížky. Převzato z [21].

Pozn.: Odečtení úhlu α v argumentu funkce \sin ve vztahu 3.3 a jeho přičtení k \arccos ve vztahu 3.3 kompenzuje to, že úhly jsou odečítány od normály mřížky a ne od normály funkční plochy. S ohledem na sudý charakter funkce \cos je ve vztahu 3.3 nutno po aplikování funkce \arccos přiřadit úhlům příslušícím záporným řádům záporné znaménko (leží vlevo od normály funkční plochy)². V praxi se kolmým dopadem rozumí dopad podél normály mřížky. V takovém případě nejsou úhly řádů s opačnými znaménky symetrické (symetrické jsou podle normály funkční plochy).

²Minimálně pro rozsah studovaných mřížek toto tvrzení platí.

Pro požadované chování blejzované reflexní mřížky (všechna intenzita do určitého řádu) je nutné mřížku tzv. „naladit“. Z tohoto pohledu je nejpodstatnější správně naladit hloubku h . Obecně získáme optimální hloubku (při dopadu podél normály mřížky) vztahem [22]:

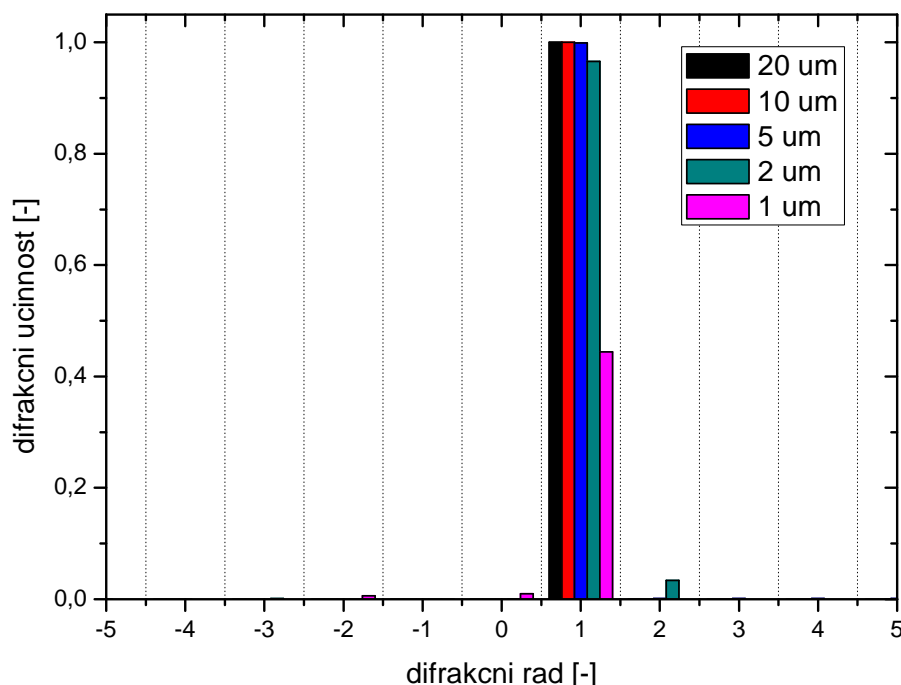
$$h_r = \frac{\lambda_{opt}}{2} \cdot m; \quad (3.4)$$

λ_{opt} – vlnová délka, pro kterou je optimalizována účinnost blejzované mřížky (tzv. blejzovaná vlnová délka) [nm],

m – difrakční řád, pro který má být mřížka naladěna (difrakční účinnost teoreticky 100 %), v tomto vztahu mají smysl samozřejmě pouze kladné řády, záporné jsou principiálně vyloučeny.

Ze vztahu 3.4 vidíme, že blejzovaná mřížka bude mít požadované vlastnosti (maximální difrakční účinnost pro jeden řád) pouze pro jednu vlnovou délku. Dalšími velmi důležitými parametry jsou planarita funkční plochy a strmost parazitní hrany (hrana kolmá k podložce) [21].

Vztah 3.4 je jistým zjednodušením, které např. neuvažuje vliv periody (viz obr. 3.2). Přesněji lze hloubku určit numerickou simulací (např. v programu GSolver) nebo iterativně ze vztahu 3.2. Nicméně toto zjednodušení postihuje poměrně široké spektrum mřížek, a proto je hojně používáno [22].

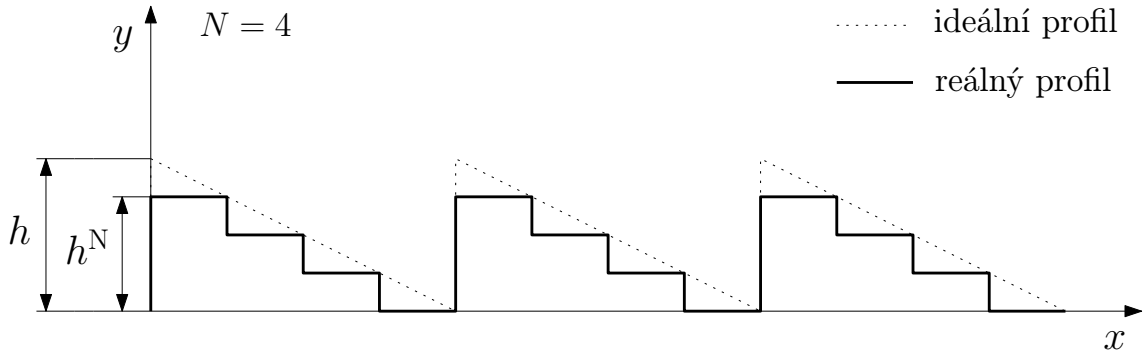


Obr. 3.2: Srovnání účinnosti difrakčních řádů pro reflexivní mřížky s různou periodou. Vypočteno (dle vztahu 3.2) pro kolmý dopad a hloubku podle 3.4 pro $\lambda_{opt} = 635$ nm.

Z obr. 3.2 je vidět, že pro menší periody (typově 1 μm a menší) již vztah 3.2 nevede ke správným výsledkům, a to nejenom vlivem optimalizace hloubky bez uvážení periody. Podle simulací v programu GSolver (více v 4.2) pro hloubku optimalizovanou vztahem 3.4 je difrakční účinnost prvního řádu $\eta_1 \simeq 0,67$. Pro hloubku optimalizovanou prostřednictvím simulace je simulovaná difrakční účinnost prvního řádu dokonce $\eta_1 \simeq 0,87$.

3.1.1 Reflexní blejzovaná mřížka připravená elektronovou litografií

Výše uvedené vztahy platí pro ideální případ blejzované mřížky s hladkou planární funkční plochou. Blejzované mřížky připravené elektronovou litografií se aproximují jako N -úrovňové struktury (schodovitý profil) – viz obr. 3.3 [23, 24].



Obr. 3.3: Srovnání ideálního profilu s reálným profilem ($N = 4$).

Počet úrovní je potřeba zvolit dostatečně velký (aby nedocházelo ke snižování difrakční účinnosti). Na druhou stranu vysoký počet úrovní bude prodlužovat dobu expozice a výpočtů korekcí proximity efektu.

Vztah 3.4 lze pro výpočet hloubky reálné reflexní blejzované mřížky upravit jako:

$$h_r^N = \left[\frac{N-1}{N} \right] \frac{\lambda_{opt}}{2} \cdot m; \quad (3.5)$$

h_r^N – optimalizovaná hloubka reálné mřížky pro λ_{opt} [nm],

N – počet úrovní [-],

m, λ_{opt} – stejné jako v 3.4.

Korekční člen v hranaté závorce vystihuje fakt, že reálná hloubka této vrstvy je vzdálenost mezi rovinami první a poslední úrovně (znázorněno na obr. 3.3).

3.2 Transmisní blejzovaná mřížka

Účinnost jednotlivých řádů této mřížky pro kolmý dopad (geometrie viz. 3.4) lze vyjádřit rovnicí [25]:

$$\eta_{t,m} = \text{sinc}^2 \left\{ \pi \left[\frac{(n-1)h}{\lambda} - m \right] \right\}; \quad (3.6)$$

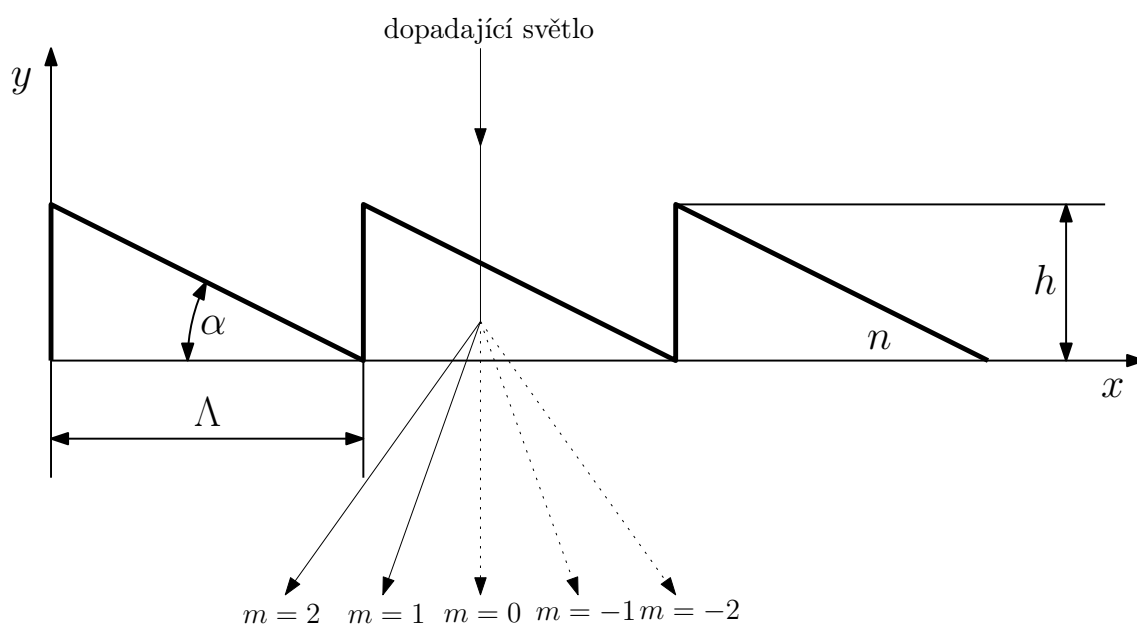
$\eta_{t,m}$ – účinnost m -tého difrakčního řádu pro transmisní blejzovanou mřížku [-],

n - index lomu materiálu mřížky [-],

h – výška blejzované mřížky [nm],

λ – vlnová délka světla [nm],

m – difrakční řád [-].



Obr. 3.4: Schematický náčrt ideálního profilu transmisní blejzované mřížky. Převzato (upraveno) z [23, s. 6-7].

Pro požadované chování transmisní blejzované mřížky je opět nutné „naladit“ její parametry, především hloubku. Při kolmém dopadu (podél normály mřížky) lze vztah pro optimální hloubku vyjádřit jako [23]:

$$h_t = \frac{\lambda_{\text{opt}}}{n - 1} \cdot m; \quad (3.7)$$

λ_{opt} – vlnová délka, pro kterou je optimalizována účinnost blejzované mřížky (tzv. blejzovaná vlnová délka) [nm],

n – index lomu materiálu mřížky [-],

m – difrakční řád, pro který má být mřížka naladěna (difrakční účinnost teoreticky 100 %), v tomto vztahu mají smysl samozřejmě pouze kladné řády.

Z tohoto vztahu vyplývá, že pouze pro jednu vlnovou délku bude mít transmisní blejzovaná mřížka požadované vlastnosti (maximální difrakční účinnost do jednoho řádu). Výslednou difrakční účinnost tedy hlavně ovlivní přesnost dodržení hloubky, rovinnost funkční plochy a strmost parazitní hrany.

3.2.1 Transmisní blejzovaná mřížka připravená elektronovou litografií

Blejzované mřížky připravené elektronovou litografií se aproximují jako N -úrovňové struktury (schodovitý profil) – viz obr 3.3. Vztah 3.7 lze pak upravit pro výpočet hloubky reálné transmisní mřížky jako:

$$h_t^N = \left[\frac{N - 1}{N} \right] \frac{\lambda_{\text{opt}}}{n - 1} \cdot m; \quad (3.8)$$

Korekční člen v hranaté závorce má stejný význam jako v 3.5. Ostatní proměnné shodné s 3.7.

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V průběhu práce na experimentální části došlo k optimalizaci rozsahu zkoumaných mřížek. V tab. 4.1 a 4.2 je uveden finální rozsah mřížek, které byly zdárně na-exponovány a vyhodnoceny. Obecně lze mřížky rozdělit do tří kategorií: reflexní mřížky optimalizované pro první řád, transmisní mřížky optimalizované pro první řád a transmisní mřížky optimalizované pro druhý řád. Reflexní i transmisní mřížky naladěné na první řád byly exponovány do „mělkého“ rezistu, transmisní mřížky naladěné na druhý řád do „hlubokého“ rezistu.

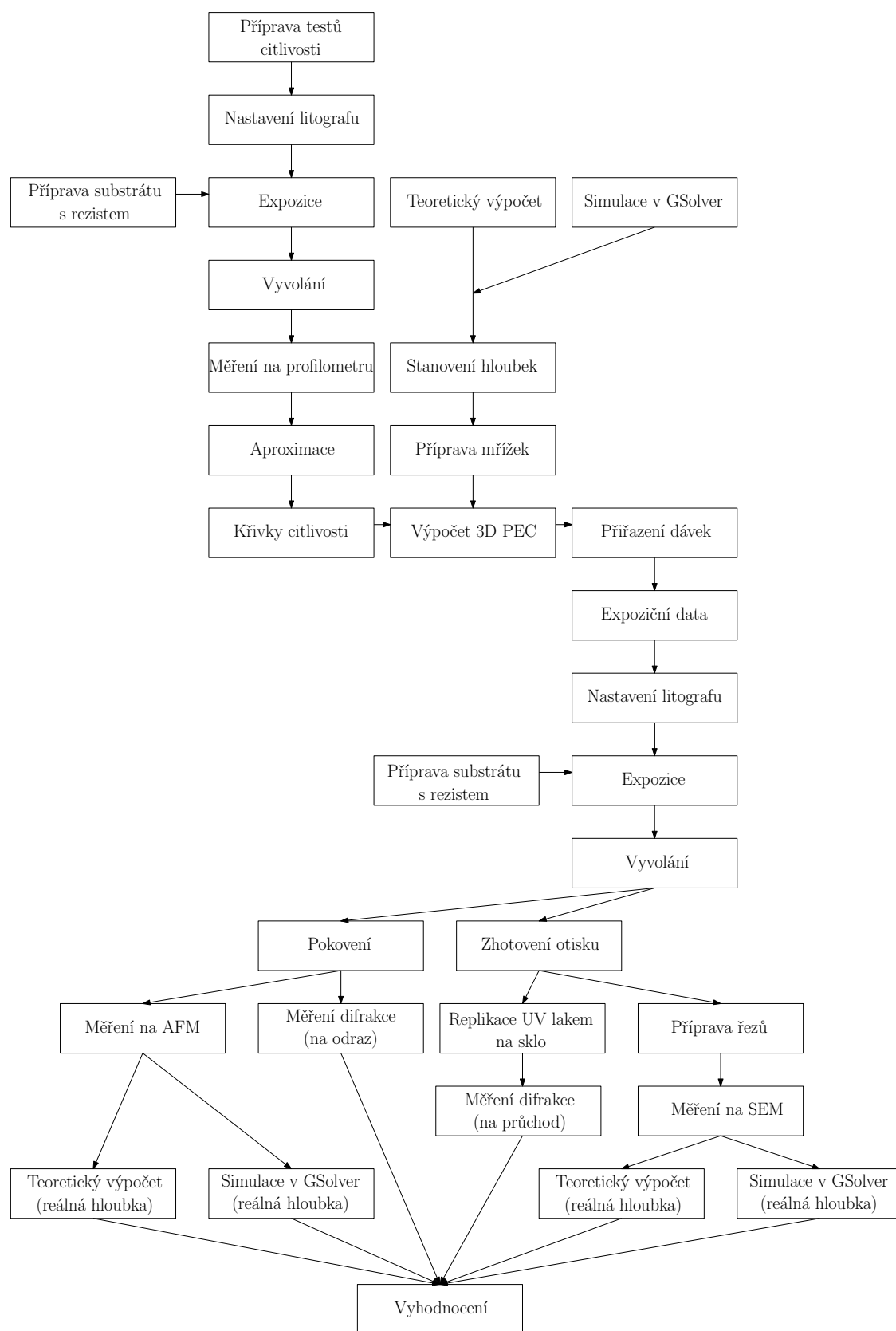
Tab. 4.1: Přehled mřížek exponovaných do mělkého rezistu.

Reflexní, 1. řád		Transmisní, 1. řád	
Perioda [μm]	Počet úrovní [-]	Perioda [μm]	Počet úrovní [-]
1	10	2	10
1	20	2	20
5	10	5	16
5	20	5	32
10	10	10	16
10	20	10	32

Tab. 4.2: Přehled mřížek exponovaných do hlubokého rezistu.

Transmisní, 2. řád	
Perioda [μm]	Počet úrovní [-]
2	10
5	16
5	32
10	16
10	32

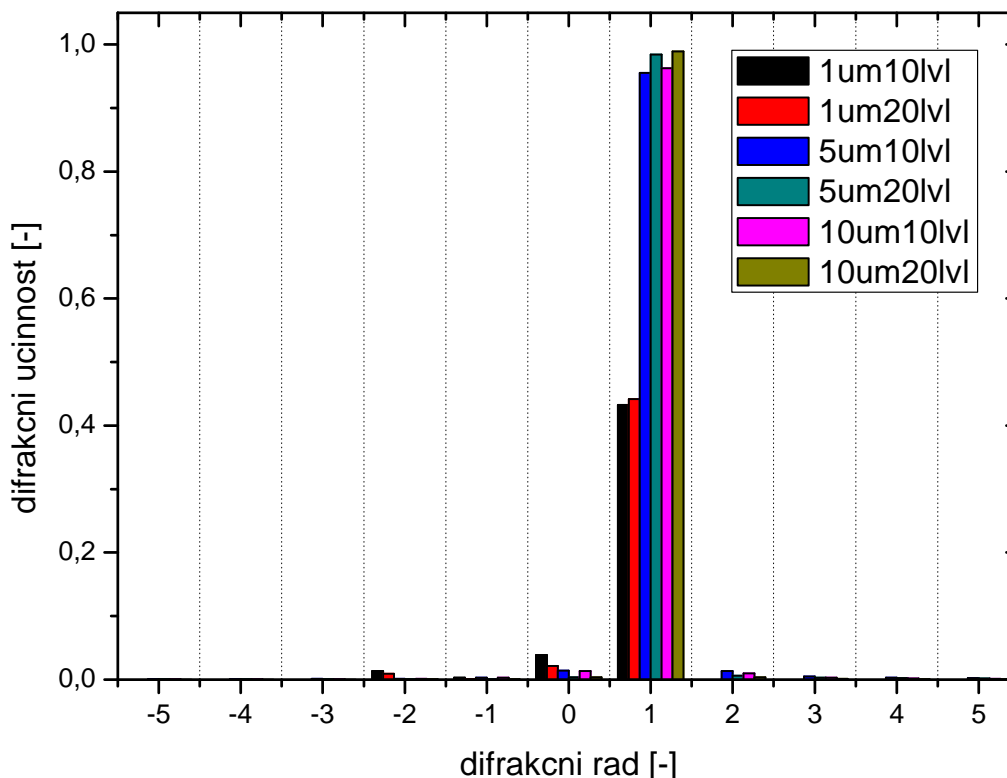
Jednotlivé kroky řešení experimentální části jsou zachyceny na obr. 4.1. V této kapitole jsou následně podrobněji popsány pouze stěžejní kroky práce. Všechny expozice proběhly dle postupu uvedeného v 2.2.



Obr. 4.1: Schéma experimentální části.

4.1 Teoretický výpočet

Hloubka mřížek byla optimalizována dle vztahu 3.5 pro reflexní mřížky a vztahu 3.8 pro transmisní mřížky. Tyto vztahy již uvažují počet úrovní. Následně byly použity vztahy pro výpočet difrakčních účinností jednotlivých řádů – rov. 3.2 (reflexní mřížky) a rov. 3.6 (transmisní mřížky). Výsledky jsou uvedeny na obr. 4.2 - 4.4.

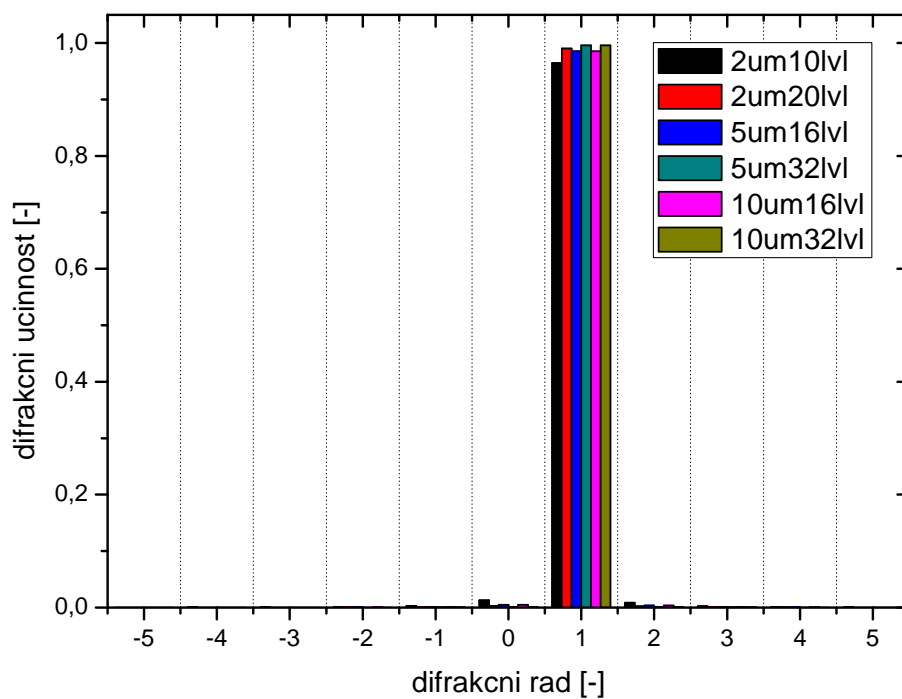


Obr. 4.2: Teoretický výpočet difrakčních účinností jednotlivých řádů pro reflexní mřížky naladěné na první řád.

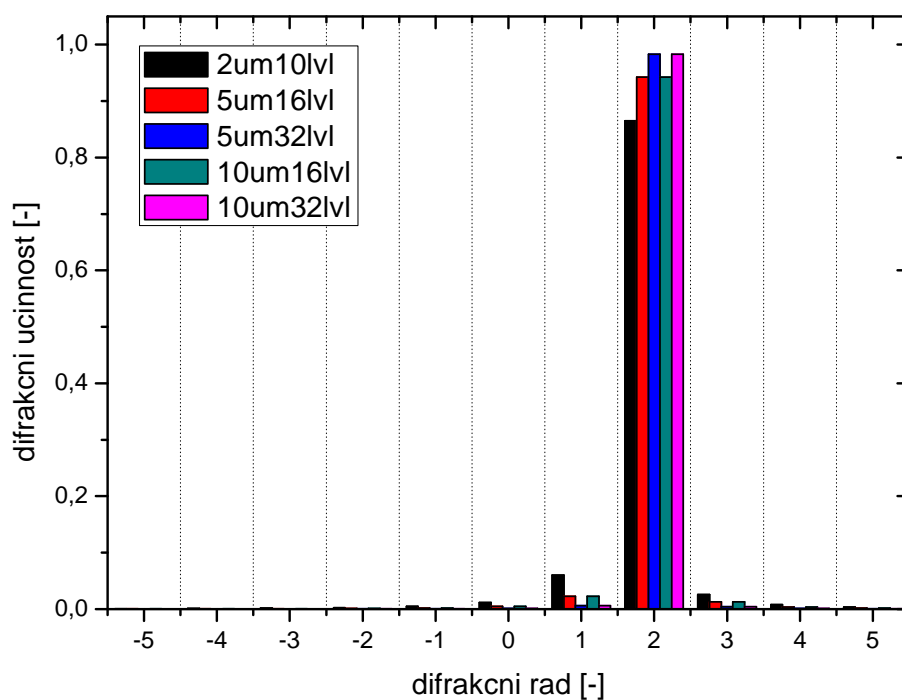
Z obr. 4.2 je vidět, že u reflexních mřížek malých period ($\Lambda = 1 \mu\text{m}$) dochází k významnému poklesu intenzity nejen u požadovaného řádu. Pro ostatní mřížky ($\Lambda \geq 5 \mu\text{m}$) pak jsou výsledky dle předpokladů – víceúrovňové mají vyšší difrakční účinnost.

U transmisních mřížek naladěných na první řád (obr. 4.3) dosahují intenzity v požadovaném řádu téměř 100 %. Opět platí, že víceúrovňové mají vyšší difrakční účinnost.

U transmisních mřížek naladěných na druhý řád (obr. 4.4) se opět projevuje pokles intenzity u $1 \mu\text{m}$ mřížky a zvětšují se rozdíly v intenzitě řádů v závislosti na počtu úrovní.



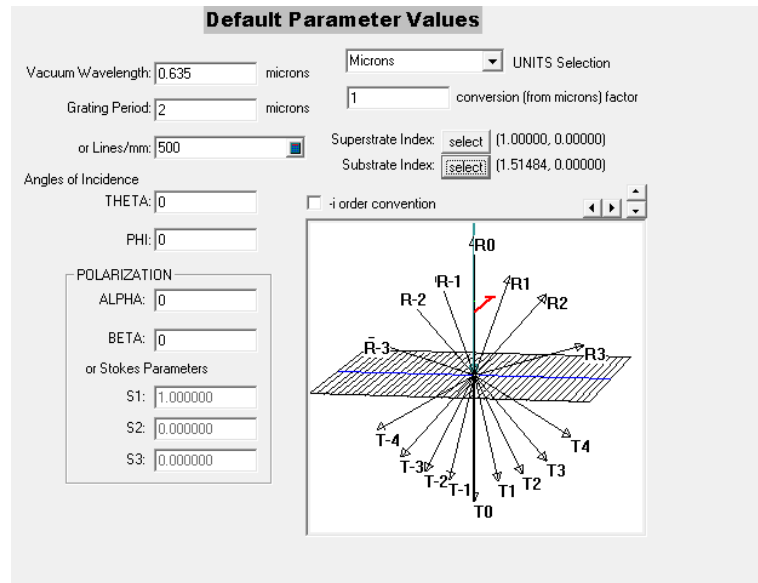
Obr. 4.3: Teoretický výpočet difrakčních účinností jednotlivých řádů pro transmisní mřížku naladěnou na první řád.



Obr. 4.4: Teoretický výpočet difrakčních účinností jednotlivých řádů pro transmisní mřížku naladěnou na druhý řád.

4.2 Simulace v programu GSolver

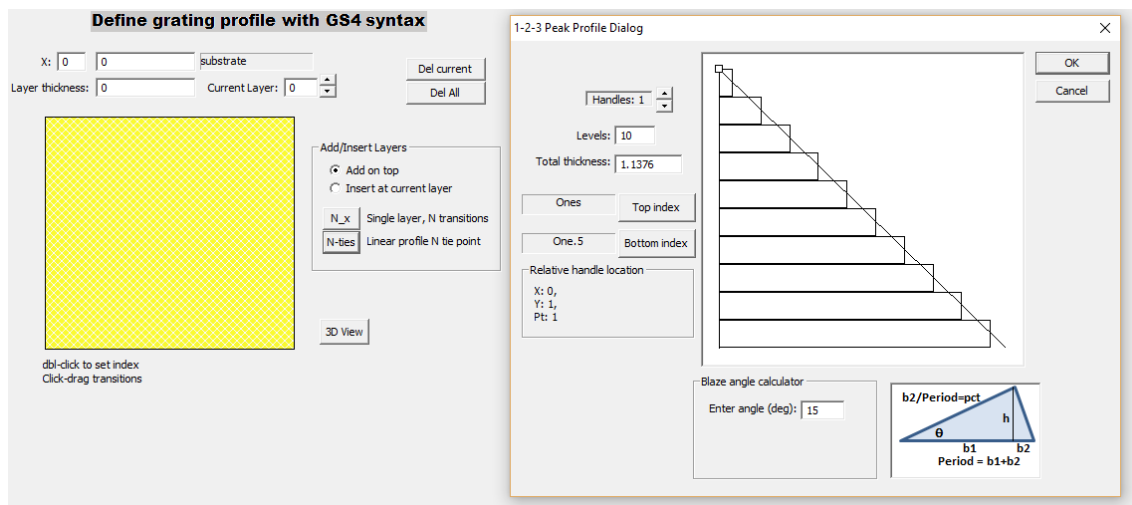
Nejprve je nutné ověřit správnost teoretických předpokladů pro návrh mřížek. Především vztahy pro optimální hloubku mřížky, která je klíčová pro požadované vlastnosti. Za tímto účelem byly provedeny simulace v programu GSolver. Program je založen na získání numerického řešení Maxwellových rovnic pro periodické struktury na rozhraní dvou homogenních izotropních prostředí - okolí a substrát [26].



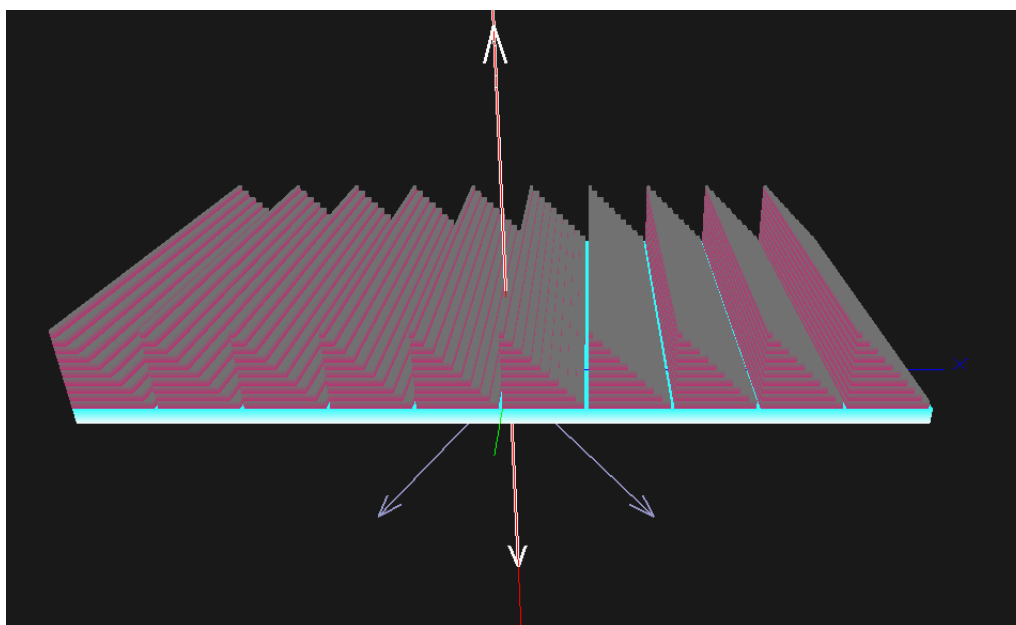
Obr. 4.5: Okno programu GSolver pro nastavení základních parametrů.

Prvním krokem je nastavení základních parametrů: vlnová délka, polarizace a úhel dopadajícího světla, perioda mřížky, indexy lomu okolí a substrátu (viz obr. 4.5). Následně je několik možností jak nadefinovat profil mřížky. Pro účely blejzovaných mřížek je nejvhodnější GS4 editor, který umožňuje nadefinovat požadovaný tvar a poté zadat počet úrovní, kterými se má tvar aproximovat (viz obr. 4.6). Současně je také možné nastavit index lomu materiálu struktury. Editor také umožňuje náhled ve 3D (viz obr. 4.7).

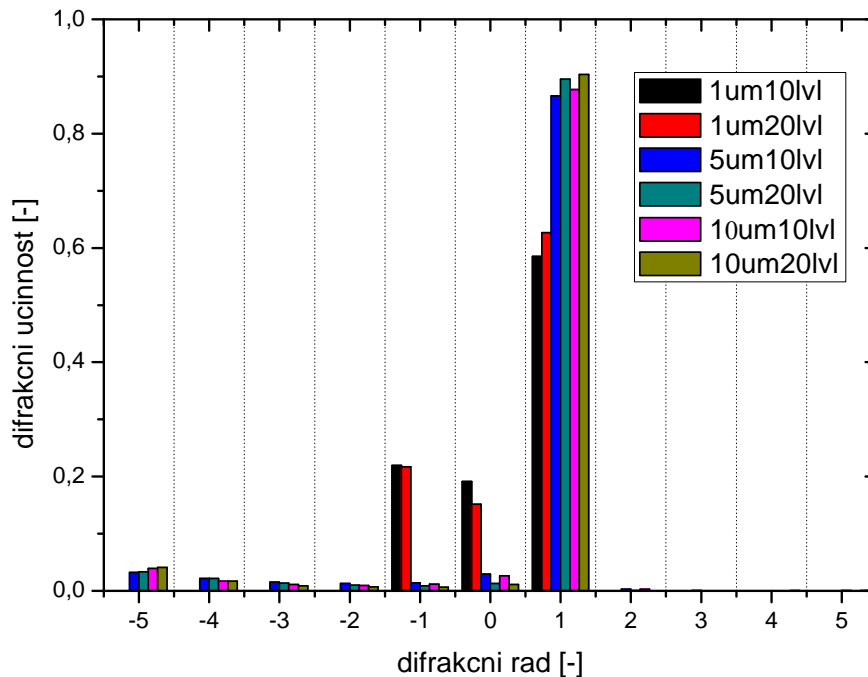
Výsledkem simulace je pak intenzita jednotlivých difrakčních řádů (odražené i prošlé) a celkový součet intenzity v jednotlivých řádech. Simulace byly provedeny pro všechny mřížky z tab. 4.1 a 4.2 s hloubkou optimalizovanou podle vztahů 3.5 a 3.8. Parametry byly nastaveny tak, aby odpovídaly plánovanému experimentu. Vlnová délka dopadajícího světla $\lambda = 635$ nm, zadána TE polarizace. V teoretických výpočtech difrakčních účinností v kapitole 3 není polarizace zahrnuta (resp. vztahy v případě koherentního zdroje světla, např. laser, odpovídají TE polarizaci). Výsledky simulací jsou na obr. 4.8 a 4.9.



Obr. 4.6: Okno GS4 editoru programu GSolver pro vytvoření profilu mřížky.



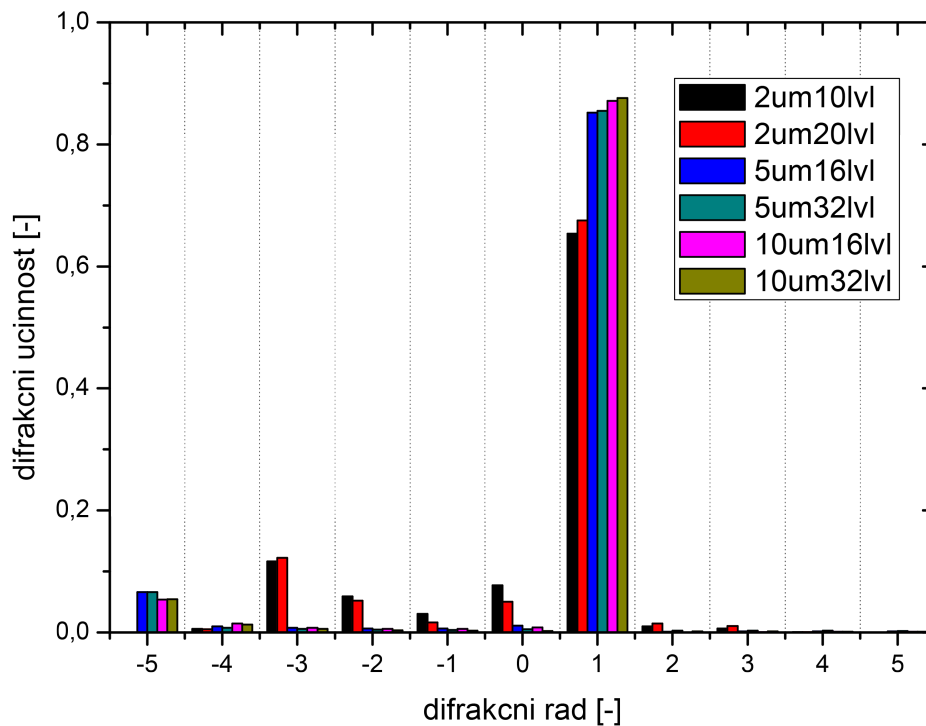
Obr. 4.7: Okno GS4 editoru programu GSolver se 3D zobrazením zadaného profilu mřížky.



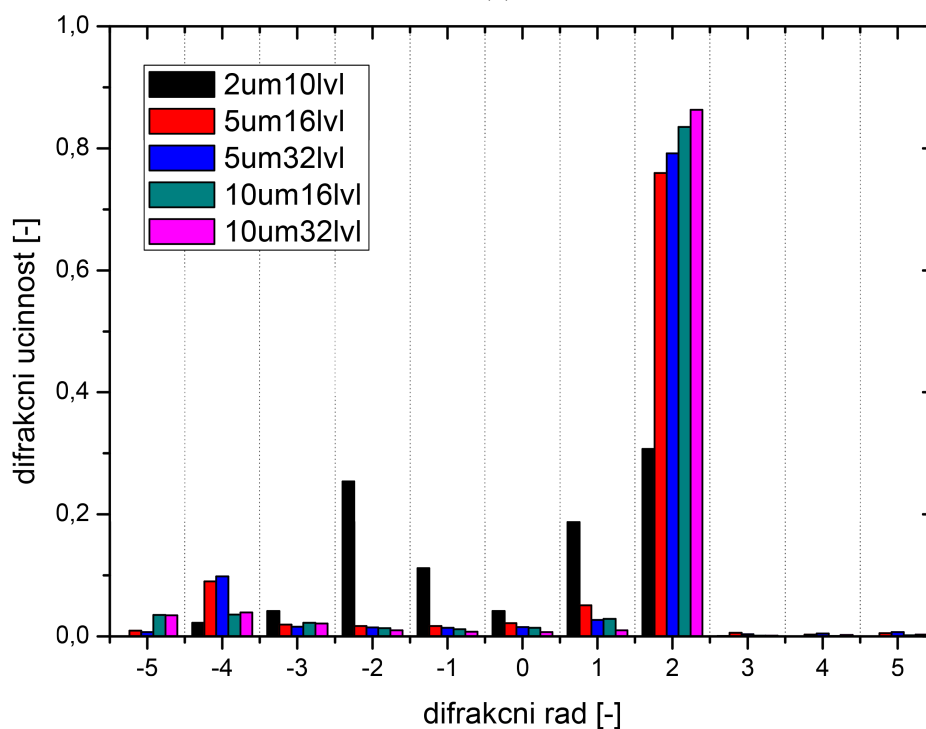
Obr. 4.8: Výsledek simulace difrakčních účinností pro reflexní blejzované mřížky naladěné na první řád. Pro index lomu materiálu je použit Drudeho model stříbra (rezist bude pokoven tenkou vrstvou stříbra).

Výsledky pro reflexní mřížky znázorněné na obr. 4.8 lze porovnat s obr. 4.2, ve kterém jsou uvedeny hodnoty vypočítané podle teoretického vztahu. Pro mřížky větších period ($5 - 10 \mu\text{m}$) je simulovaná difrakční účinnost nižší o cca 10 %. Tento jev lze odůvodnit reálným profilem (funkční plocha není hladká). U mřížek s menší periodou je rozdíl větší, a to vlivem nepřesnosti teoretického vztahu (viz komentáře pod obr. 3.1). Z výsledků simulací plyne, že vyšší počet úrovní vede k vyšší difrakční účinnosti, protože se profil více blíží ideálnímu.

Výsledky pro transmisní mřížky (obr. 4.9) je možné porovnat s teoretickým výpočtem – obr. 4.3 pro mřížky naladěné na první řád a obr. 4.4 pro mřížky naladěné na druhý řád. U vyšších period ($5 - 10 \mu\text{m}$) je výsledek simulace nižší cca o 10 % v preferovaném řádu. Nižší hodnota je opět zapříčiněna reálným profilem a navíc se zde projevují Fresnelovy ztráty na rozhraní. U menší periody ($2 \mu\text{m}$) opět dochází k poklesu hodnot, pro mřížku naladěnou na druhý řád je tento pokles výraznější. U této mřížky také dochází ke zvýšení hodnot intenzity pro ostatní řády.



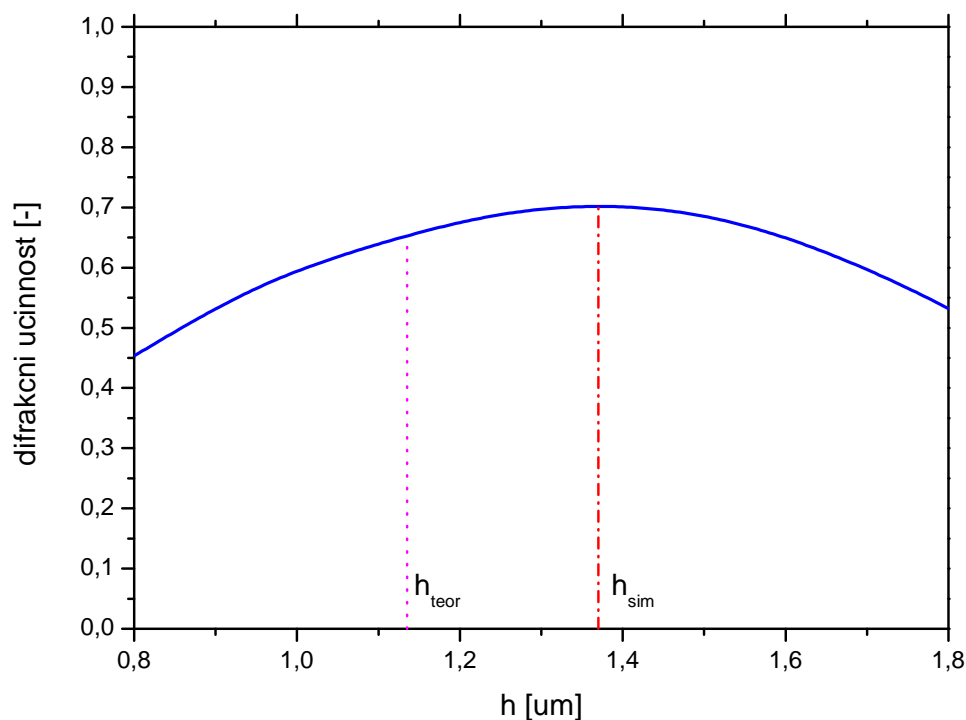
(a)



(b)

Obr. 4.9: Výsledek simulace difrakčních účinností pro transmisní blejzované mřížky naladěné na (a) první řád a (b) druhý řád. Jako index lomu materiálu je použita konstantní hodnota $n = 1,5$, která přibližně odpovídá UV laku Radcote, do kterého budou mřížky replikovány. Pro index lomu substrátu je použita tabulková hodnota pro sklo BK7, které bude použito v experimentu.

Pro stanovení hloubek blejzovaných mřížek v dalších krocích budou použity vztahy 3.5 a 3.8. Simulace potvrdily, že tyto vztahy správně optimalizují hloubky pro mřížky s větší periodou ($5 - 10 \mu\text{m}$). Pro mřížky s menší periodou ($1 - 2 \mu\text{m}$) ukazují výsledky simulací nižší difrakční účinnosti v požadovaných řádech. Nicméně i v případě uvolnění hloubky jako parametru simulace nedosahují difrakční účinnosti stejně vysokých hodnot jako u mřížek s vyšší periodou. Maximální účinnost zpravidla získáme pro hloubku „o něco vyšší“ než podle teoretických vztahů. Na obr. 4.10 vidíme simulaci s hloubkou jako volným parametrem.



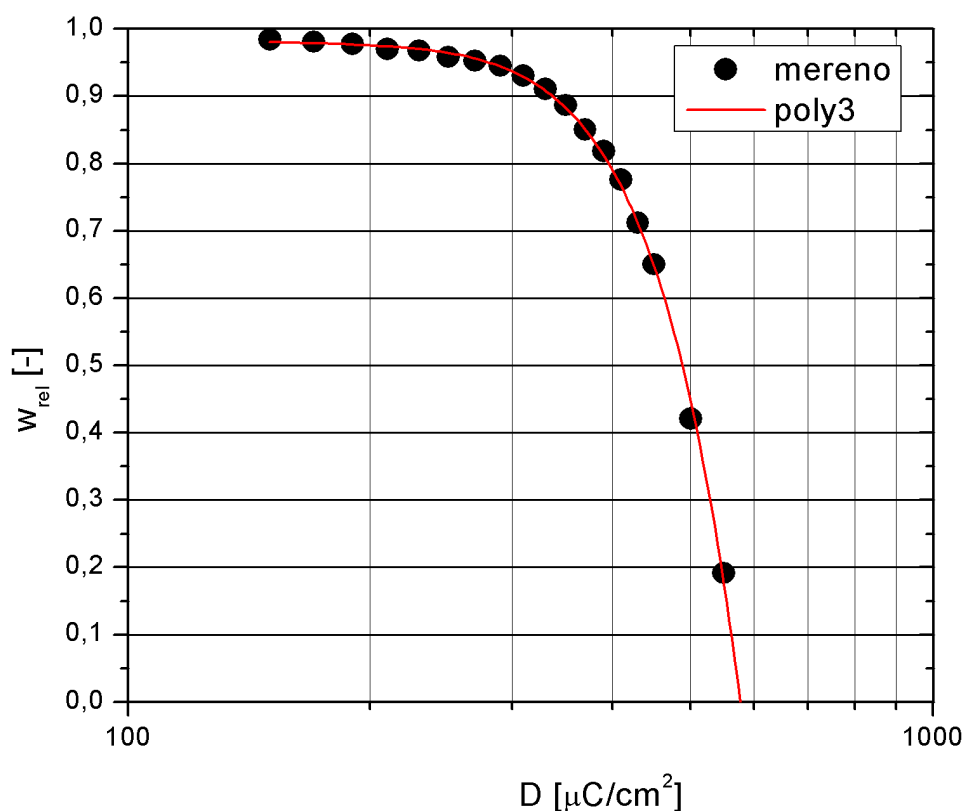
Obr. 4.10: Závislost difrakční účinnosti prvního řádu transmisní blejzované (nailaděné na první řád) mřížky na její hloubce. $\Lambda = 2 \mu\text{m}$, $N = 10$.

Z obr. 4.10 je vidět, že závislost je relativně pozvolná. Rozdíl hloubek určených simulací a teoretickým výpočtem je $\Delta h \simeq 0,17 \mu\text{m}$, rozdíl v difrakční účinnosti je $\Delta \eta < 0,05$.

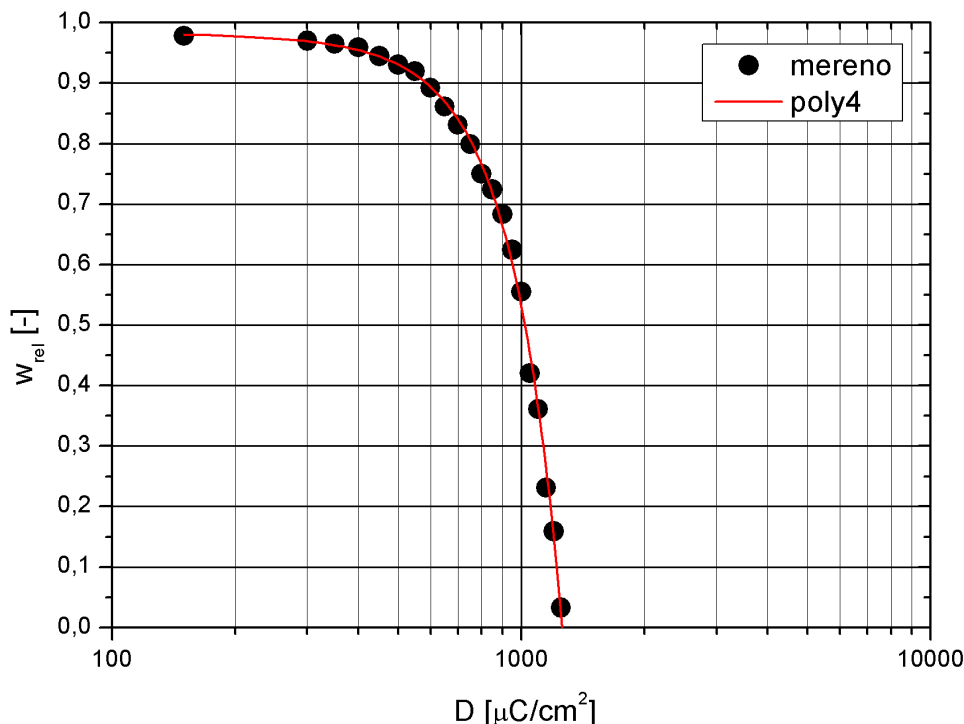
4.3 Testy citlivosti

Provedení testů citlivosti je nezbytné pro přesný výpočet expozičních dávek a korekce proximity efektu. V praxi se jedná o naexponování sady čtvercových struktur, přičemž se postupně zvyšuje expoziční dávka. Po vyvolání se na profilometru změří hloubka každého čtverce. Získá se tak závislost úbytku tloušťky na expoziční dávce.

S ohledem na to, že se bude exponovat do dvou typů rezistu, je třeba připravit test citlivosti pro každý z nich. Již výše bylo uvedeno, že rezisty budou pro snadné odlišení označovány jako mělký a hluboký. Jedná se o různě modifikované PMMA. Na obr. 4.11 je znázorněna křivka citlivosti pro mělký rezist, na obr. 4.12 pro hluboký rezist.



Obr. 4.11: Křivka citlivosti pro mělký rezist (PMMA, $w_0 = 2615$ nm). Naměřené data jsou proloženy polynomem stupně 3. Vývojka IPA:H₂O, čas vyvolání $t_v = 180$ s.



Obr. 4.12: Křivka citlivosti pro hluboký rezist (PMMA, $w_0 = 7974$ nm). Naměřená data jsou proložena polynomem stupně 4. Vývojka IPA:H₂O, čas vyvolání $t_v = 30$ s.

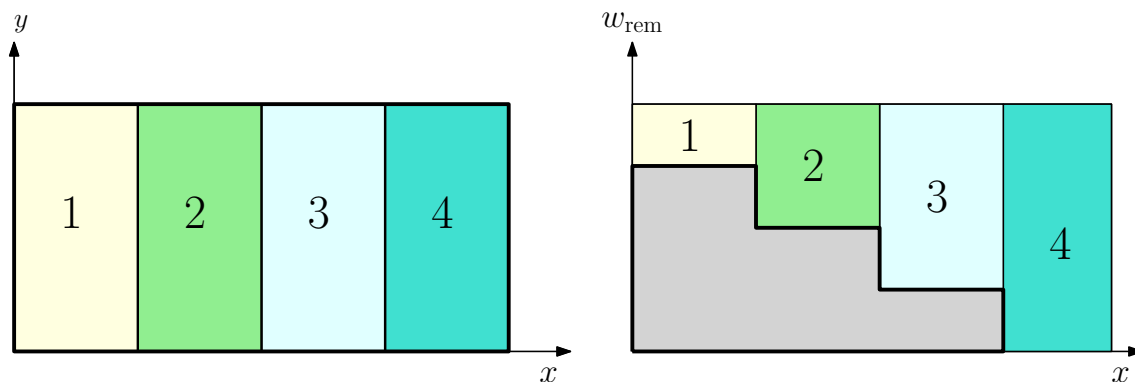
4.4 Příprava expozičních dat

Pro přípravu expozičních dat se používají různé programy. V této práci se jedná o návrhové prostředí Layout BEAMER, jehož výhodou je grafické zobrazení jednotlivých kroků (př. na obr. 4.15). V tomto prostředí je možné provést všechny potřebné kroky přípravy od vytvoření samotné struktury až po výpočet korekce proximity efektu a export dat.

4.4.1 Generování mřížek

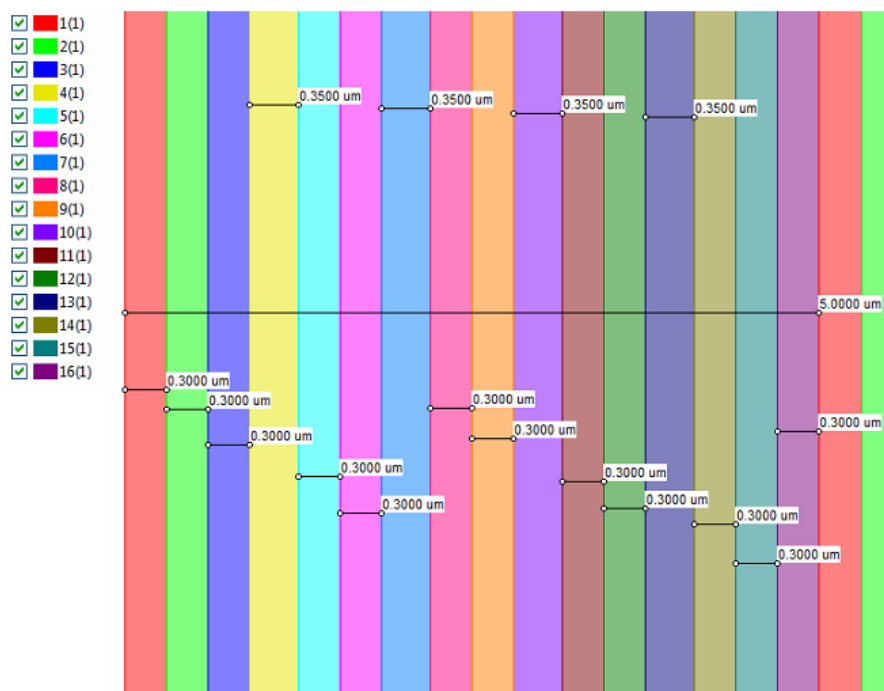
Prvním krokem přípravy expozičních dat je navržení samotné struktury (tvar, rozměry). Každá úroveň blejzované mřížky se definuje a exponuje zvlášť. Způsob přípravy a expozice jednotlivých úrovní je na obrázku 4.13.

Samotná struktura (tvar, rozměry) se definuje prostřednictvím základních tvarů a jejich opakováním. Pro přípravu blejzovaných mřížek postačí nadefinování různých velkých obdélníků, které se pak budou opakovat. Výsledná plocha vyplněná mřížkou bude mít velikost 3×3 mm. Dále je nutné zvážit velikost základního kroku svazku (BSS – Beam step size). V našem případě bude $BSS = 50$ nm, a tedy všechny rozměry (i každé úrovně) musí být jeho násobkem (následkem toho může dojít k mírné



Obr. 4.13: Způsob přípravy a zápisu blejzovaných mřížek demonstrováný na čtyřúrovňové struktuře.

změně periody – v závislosti na počtu úrovní). S ohledem na časovou náročnost manuálního zápisu byl pro generování mřížek vytvořen skript v MATLABu. Po zadání počtu úrovní a periody skript vygeneruje soubor, který můžeme nahrát do prostředí Layout BEAMER, čímž získáme nadefinované vrstvy mřížky. Postupně byl skript upraven tak, aby v případě různě širokých úrovní v rámci jedné mřížky, tyto úrovně rovnoměrně rozmísťoval do středních částí mřížky (obr. 4.14). Pracovní verze skriptů jsou k nahlédnutí v příloze A.

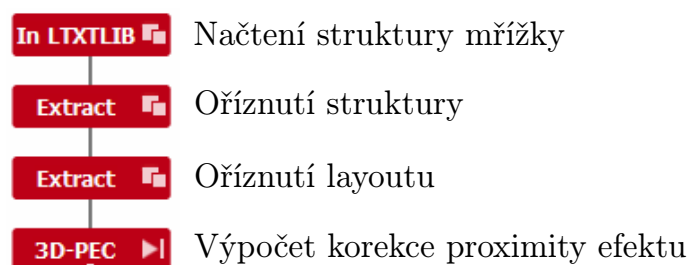


Obr. 4.14: Návrh standardní blejzované mřížky, $\Lambda = 5\mu\text{m}$, $N = 16$. Snímek z prostředí Layout BEAMER VIEWER.

Obr. 4.14 demonstruje rozdělení různě širokých úrovní v rámci jedné periody. $4\times$ je použita šířka úrovně 350 nm, $12\times$ šířka úrovně 300 nm. Dohromady má tedy mřížka periodu požadovaných 5 μm .

4.4.2 Korekce proximity efektu

Pro výpočet korekce bude použit modul 3D-PEC (3D Proximity Effect Correction) prostředí Layout BEAMER. Výpočet v celé struktuře o velikosti 3×3 mm by byl zbytečně časově náročný. Proto se struktura za pomoci modulu Extent ořízne na velikost 200×200 μm . Uspořádání celého výpočtu je na obrázku 4.15.



Obr. 4.15: Uspořádání modulů v grafickém prostředí Layout BEAMER pro výpočet korekce proximity efektu.

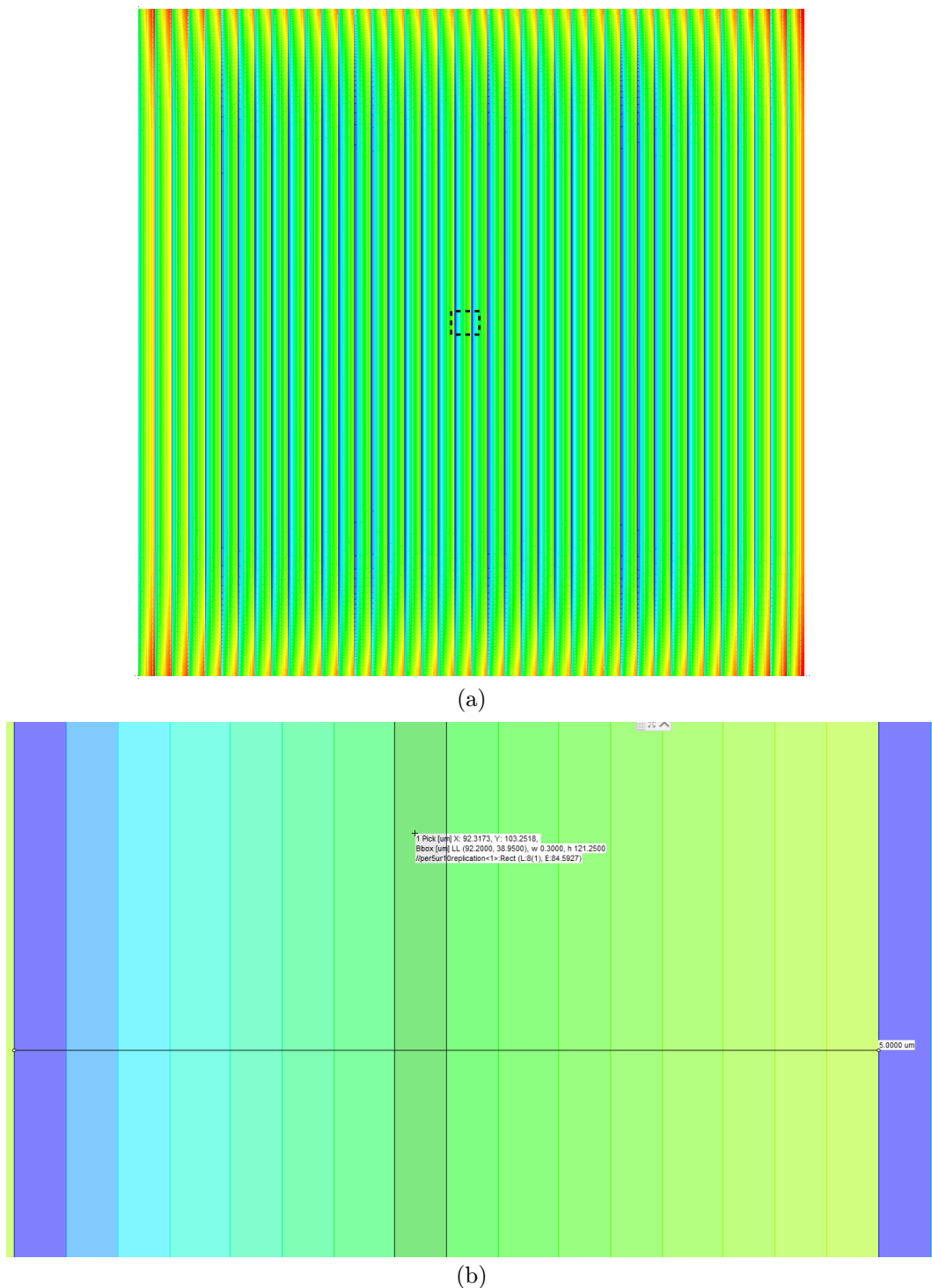
Pro výpočet korekcí proximity efektu je třeba do modulu 3D-PEC nahrát tyto vstupní data/soubory:

1. Načtenou mřížku (nahrajeme strukturu mřížky vygenerovanou skriptem).
2. PSF křivku (vybereme odsimulovanou PSF křivku, která vystihuje použitý systém rezist-substrát, viz 2.1.5).
3. Křivku citlivosti (získanou z testů citlivosti, viz 4.3).
4. Požadované hloubky jednotlivých úrovní (vypočítáme celkovou hloubku podle vztahu 3.5 nebo 3.8 a přičteme zapuštění¹ mřížky).

Dále je potřeba vybrat vhodné nastavení pro výpočet. V první řadě se volí interpretace PSF funkce, v našem případě použijeme Gaussovu aproximaci (důvody uvedeny v 2.1.6). Následně se volí, které parametry (α , β a η) budou zohledněny při výpočtu. Bude zanedbán parametr α , nebude tedy uvažován vliv laterálního rozptylu (toto zanedbání lze provést s ohledem na použitou vysokou energii primárních elektronů $E_a = 100$ keV).

Výsledkem výpočtu modulu 3D-PEC je pak zobrazení dávek jednotlivých vrstev (viz obr. 4.16), které lze v prostředí Layout BEAMER VIEWER odečíst. Získá se tak expoziční dávka pro každou vrstvu (viz tab. 4.3).

¹Zapuštění - hloubka prvního úrovně (exponuje se). Důvody k zapuštění uvedeny v 2.1.6. Mřížky v mělkém rezistu byly zapuštěny na 100 nm, v hlubokém na 500 nm.



Obr. 4.16: Výsledek výpočtu modulu 3D-PEC pro transmisní blejzovanou mřížku naladěnou na první řád s parametry: $\Lambda = 5 \text{ } \mu\text{m}$ a $N = 16$. (a) Celé pole (rozměr $200 \times 200 \text{ } \mu\text{m}$). (b) Detail o velikosti jedné periody s ukázkou odečtení expoziční dávky pro úroveň č. 8.

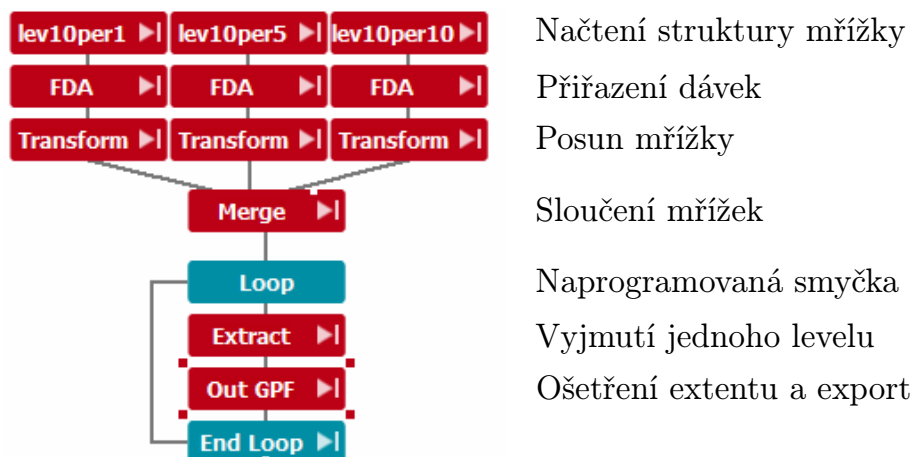
Tab. 4.3: Data pro transmisní blejzovanou mřížku naladěnou na první řád s parametry: $\Lambda = 5 \mu\text{m}$ a $N = 16$, zapuštění 100 nm. Zkratky: lvl - číslo úrovně.

lvl (dt)	h_{vrstvy} [nm]	3D-PEC dávka [$5 \mu\text{C} \cdot \text{cm}^{-2}$]
1(1)	100	29,1706
2(1)	179	46,1030
3(1)	258	56,8169
4(1)	337	64,6630
5(1)	416	70,7209
6(1)	495	75,8224
7(1)	574	80,4870
8(1)	653	84,5927
9(1)	732	88,0275
10(1)	811	91,6017
11(1)	890	95,3211
12(1)	969	98,2095
13(1)	1048	101,1853
14(1)	1127	104,2513
15(1)	1206	106,3468
16(1)	1285	109,5692

Dávky jsou uvedeny v násobku základní dávky $D_{\text{base}} = 5 \mu\text{C} \cdot \text{cm}^{-2}$. Kompletní data jsou k nahlédnutí v příloze B.

4.4.3 Přiřazení dávek a export dat

Následujícím krokem po výpočtu dávek je jejich přiřazení k jednotlivým úrovním v motivu. Pro přiřazení dávek se používá modul FDA (Field dose assignment). Pro přehlednější manipulaci s expozičními soubory se provede sloučení mřížek se stejným počtem úrovní. Kvůli potlačení viditelnosti expozičních polí (vlivem nehomogenity proudové hustoty ve svazku) se mřížky rozdělí na takový počet expozičních souborů (rozmístění expozičních polí je pro každý soubor odlišené), jako je počet úrovní pro danou mřížku. Sloučené mřížky jsou pak exportovány do formátu kompatibilního se softwarem litografu. Kroky postupu pro reflexní mřížky s 10 úrovněmi jsou zachyceny na obr. 4.17.



Obr. 4.17: Uspořádání modulů v grafickém prostředí Layout BEAMER pro přiřazení dávek a export expozičních souborů.

4.5 Nastavení litografu a expozice

Vyexportované expoziční soubory se nahrají do softwaru litografu. Pro každý expoziční soubor je vhodné nastavit proud ve svazku tak, aby bylo dosaženo maximální frekvence zápisu litografu. Nyní zbývá do litografu založit substrát s naneseným rezistem (stejným, jako byl použit pro test citlivosti), provést nastavení litografu a spustit expozici.

4.6 Vyvolání a příprava vzorků pro měření

Po naexponování mřížek následuje jejich vyvolání. Vyvolání finální expozice by mělo proběhnout v podmínkách stejných jako vyvolání testů citlivosti. Bude tedy použita stejná vývojka a stejný způsob vyvolání – nalití vývojky na povrch, následné odstředění. Čas vyvolání se volí buď stejný nebo „o něco nižší“ než u testů citlivosti. Následuje kontrola hloubky (AFM), případné dovyvolání. V tabulce 4.4 jsou uvedeny časy vyvolání provedených expozic.

Tab. 4.4: Přehled časů vyvolání jednotlivých expozic (vývojka vždy IPA:H₂O).

Označení	t_v [s]
mělký rezist	120 + 60 + 15
hluboký rezist	30

Po vyvolání je třeba mřížky připravit pro následné měření. Prvním krokem u mělkého i hlubokého rezistu bude vytvoření silikonového otisku. U transmisních mřížek

budou za pomoci UV laku a silikonového otisku mřížky replikovány na sklo. Tím se připraví vzorek pro měření difrakčních účinností těchto mřížek. U reflexních mřížek stačí původní mřížky pokovit tenkou vrstvou stříbra v naprašovače.

Zbývá připravit vzorky pro měření v elektronovém mikroskopu (SEM). Za užití silikonového otisku a UV laku mřížky zreplikujeme na krycí sklička. Následně se skličko z rubové strany nařízne, opatrně zlomí a postupně se UV lak s mřížkami sloupne. Následně je lak naříznut tak, aby jej bylo možné zlomit ve směru kolmém na úrovně mřížek. Tak se získá řez mřížky, který je po pokovení možné měřit na SEM.

4.7 Měření

Mřížky budou analyzovány celkem třemi způsoby - měření difrakční účinnosti, měření na AFM a měření řezů mřížek na SEM. S ohledem na nepřesnost měření na AFM budou pro stanovení reálných hloubek použita měření řezů na SEM (výjimka viz 4.12). V řezech je vidět reálný profil mřížky (planarita funkční hrany, strmost spádové hrany, zakřivení u dna apod.). Díky experimentálně určeným hloubkám lze provést teoretický výpočet a simulaci účinnosti difrakčních řádů pro naexponované mřížky. Takto získané hodnoty pak budou srovnány s přímo naměřenými.

4.7.1 Měření difrakční účinnosti

Pro měření difrakční účinnosti byl použit digitální luxmetr PU 550. Jako zdroj záření byl použit He-Li laser (HL11/ep laser diode module), $\lambda_{\text{laser}} = 635 \text{ nm}$. Měření bylo provedeno pro všechny mřížky.

V rámci každého typu mřížek byly provedeny 3 sady měření pro obě polarizace - TE a TM. Před měřením dané sady bylo vždy provedeno referenční měření intenzity dopadajícího záření. Toto měření bylo provedeno ve stejné vzdálenosti jako měření jednotlivých řádů a za stejných podmínek (u reflexních mřížek po odrazu od plochy „vedle mřížek“, u transmisních po průchodu plochou „vedle mřížek“). Pro přehlednost je v tabulkách pro každý řád uvedena pouze průměrná hodnota bez směrodatné odchylky (kompletní data v příloze C).

V tab. 4.5 - 4.10 je vždy vyznačen řád, na který má být mřížka naladěna. Nulové hodnoty „krajních“ řádů pro mřížky s malými periodami jsou důsledkem toho, že řády se již nenachází v polovině odraženého (reflexní mřížky) resp. prošlého světla (transmisní mřížky).

Tab. 4.5: Difrakční účinnosti jednotlivých řádů reflexních blejzovaných mřížek naladěných na první řád, TE polarizace.

mřížka	-3. [%]	-2. [%]	-1. [%]	0. [%]	1. [%]	2. [%]	3. [%]
1um10lvl	0,00	0,00	25,70	30,20	41,17	0,00	0,00
1um20lvl	0,00	0,00	23,04	48,10	26,20	0,00	0,00
5um10lvl	1,21	0,91	0,94	1,10	84,86	1,30	0,27
5um20lvl	2,63	2,29	1,65	1,07	79,01	2,47	0,30
10um10lvl	0,36	0,30	0,30	2,81	84,59	3,86	0,68
10um20lvl	0,34	0,30	0,48	4,14	78,16	7,29	1,03

Tab. 4.6: Difrakční účinnosti jednotlivých řádů reflexních blejzovaných mřížek naladěných na první řád, TM polarizace.

mřížka	-3. [%]	-2. [%]	-1. [%]	0. [%]	1. [%]	2. [%]	3. [%]
1um10lvl	0,00	0,00	11,15	5,24	78,71	0,00	0,00
1um20lvl	0,00	0,00	23,44	26,35	45,18	0,00	0,00
5um10lvl	0,21	0,16	0,27	1,42	87,02	0,66	0,09
5um20lvl	1,74	1,12	1,01	0,98	80,41	2,06	0,11
10um10lvl	0,18	0,09	0,25	3,32	84,98	3,27	0,39
10um20lvl	0,30	0,07	0,46	4,35	76,33	7,44	1,05

Tab. 4.7: Difrakční účinnosti jednotlivých řádů transmisních blejzovaných mřížek naladěných na první řád, TE polarizace.

mřížka	-3. [%]	-2. [%]	-1. [%]	0. [%]	1. [%]	2. [%]	3. [%]
2um10lvl	0,00	4,54	8,92	14,40	57,78	2,19	0,00
2um20lvl	0,00	9,57	8,22	30,99	39,55	1,42	0,00
5um16lvl	1,23	1,11	2,10	4,70	75,85	5,26	0,28
5um32lvl	0,52	0,57	1,11	7,62	62,02	15,63	0,75
10um16lvl	0,19	0,31	1,42	2,79	84,77	3,97	0,19
10um32lvl	0,28	0,57	1,75	10,56	56,01	21,68	1,30

Tab. 4.8: Difrakční účinnosti jednotlivých řádů transmisních blejzovaných mřížek naladěných na první řád, TM polarizace.

mřížka	-3. [%]	-2. [%]	-1. [%]	0. [%]	1. [%]	2. [%]	3. [%]
2um10lvl	0,00	7,89	12,80	13,92	58,36	1,61	0,00
2um20lvl	0,00	11,07	10,29	33,75	38,86	1,77	0,00
5um16lvl	1,39	1,11	2,20	4,44	76,01	5,27	0,16
5um32lvl	0,40	0,42	0,92	7,93	62,76	15,73	0,80
10um16lvl	0,38	0,38	1,46	2,83	84,04	4,01	0,19
10um32lvl	0,35	0,52	1,70	11,07	56,49	21,32	1,13

Tab. 4.9: Difrakční účinnosti jednotlivých řádů transmisních blejzovaných mřížek naladěných na druhý řád, TE polarizace.

mřížka	-3. [%]	-2. [%]	-1. [%]	0. [%]	1. [%]	2. [%]	3. [%]
2um10lvl	6,27	3,66	2,68	15,89	24,55	5,85	23,98
5um16lvl	1,45	3,22	4,01	7,40	3,74	67,88	2,71
5um32lvl	1,97	4,08	3,94	4,21	5,39	62,37	6,91
10um16lvl	0,86	1,08	1,70	2,26	11,04	65,77	8,44
10um32lvl	0,71	0,57	0,84	1,25	18,57	54,58	13,99

Tab. 4.10: Difrakční účinnosti jednotlivých řádů transmisních blejzovaných mřížek naladěných na druhý řád, TM polarizace.

mřížka	-3. [%]	-2. [%]	-1. [%]	0. [%]	1. [%]	2. [%]	3. [%]
2um10lvl	10,99	1,13	2,26	18,27	29,22	7,01	20,61
5um16lvl	1,35	2,98	4,82	8,85	4,57	66,01	3,59
5um32lvl	2,19	4,45	3,94	4,53	4,40	64,04	7,38
10um16lvl	0,93	1,21	1,60	2,04	10,53	64,78	9,40
10um32lvl	0,91	0,93	1,06	1,50	17,29	54,92	14,68

4.7.2 Měření řezů mřížek na SEM

Výše byl popsán postup přípravy vzorků pro měření na SEM. Před samotným měřením byly vzorky pokoveny tenkou vrstvou Cr (~ 10 nm). Všechny mřížky byly na SEMu zobrazeny a byla změřena jejich hloubka (viz obr. 4.18). Pouze u 20lvl mřížek nebylo měření řezů vypovídající, a proto pro stanovení jejich hloubek bylo použito AFM (viz 4.12). Průměrné hodnoty a odchylky pro naměřené hloubky jsou uvedeny v tab. 4.11.

Tab. 4.11: Porovnání naměřených hloubek mřížek na SEM s hloubkou jejich designu. Pro každou hodnotu je uvedena rozšířená nejistota s užitím 95% konfidenčního intervalu Studentova rozdělení. U mřížek, kde nebyl dostatečný počet vypovídajících snímků ze SEM není uvedena. ♣ - mřížky se zkresleným profilem (chyba expozice), nebudou nadále vyhodnocovány.

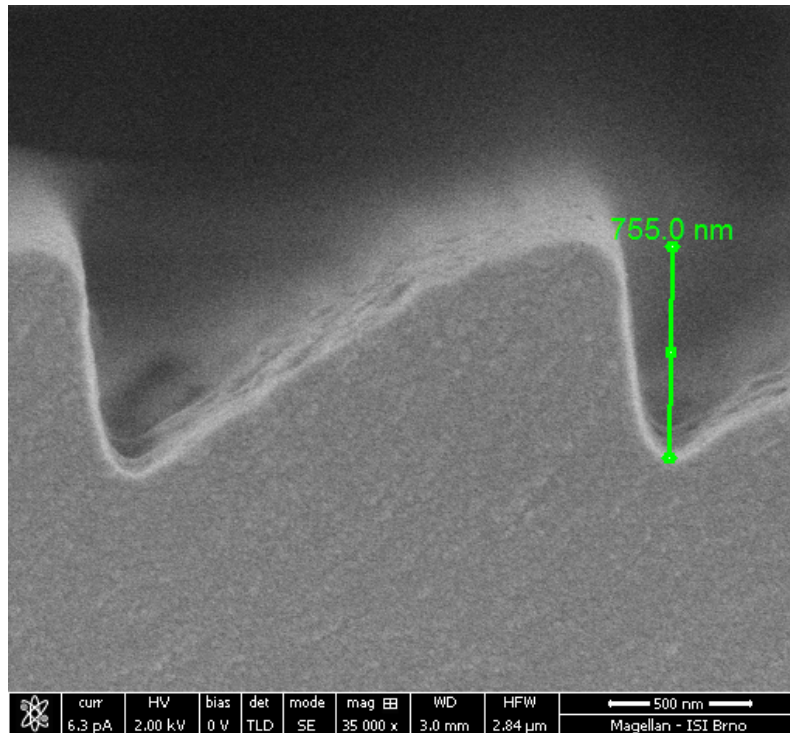
Reflexní mřížky, 1.řád			
Perioda [μm]	Počet úrovní [-]	h_{design} [nm]	h_{SEM} [nm]
1	10	284,4	239, 94 \pm 42, 72
5	10	284,4	350, 73 \pm 24, 08
10	10	284,4	353, 70

Transmisní mřížky, 1. řád			
Perioda [μm]	Počet úrovní [-]	h_{design} [nm]	h_{SEM} [nm]
2	10	1137,6	781, 64 \pm 26, 94
2	20 ♣	1200,8	643, 53 \pm 21, 13
5	16	1185,0	1320, 80 \pm 27, 16
5	32	1224,5	1430, 50 \pm 28, 96
10	16	1185,0	1350, 80 \pm 54, 05
10	32	1224,5	1698, 25 \pm 72, 35

Transmisní mřížky, 2. řád			
Perioda [μm]	Počet úrovní [-]	h_{design} [nm]	h_{SEM} [nm]
2	10 ♣	2275,2	1438, 00
5	16	2370,0	1962, 80 \pm 33, 07
5	32	2449,0	2262, 40 \pm 77, 23
10	16	2370,0	2149, 50 \pm 25, 35
10	32	2449,0	2459, 50 \pm 32, 86

Je vidět, že u menších period ($\Lambda \leq 2 \mu\text{m}$) jsou reálné hloubky mřížek nižší než v designu. U mřížek s větší periodou ($\Lambda \geq 5 \mu\text{m}$) v mělkém rezistu jsou tyto

hloubky vyšší, v hlubokém rezistu nižší. Tyto odlišnosti jsou důsledkem nepřesnosti kontrolního měření hloubek na AFM při vyvolání. Dále je obtížné sladit celý proces tak, aby pro různé mřížky na stejné podložce (v rámci jedné iterace) bylo dosaženo požadovaných parametrů u každé mřížky.



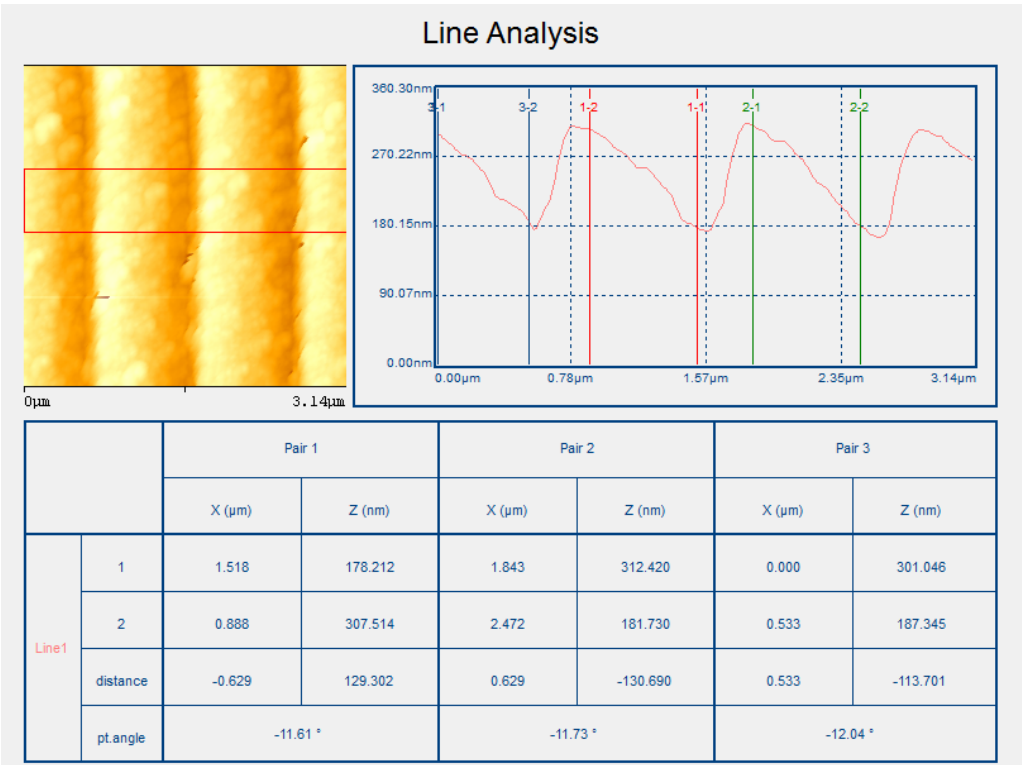
Obr. 4.18: Měření hloubky mřížky na SEM. Transmisní mřížka naladěná na 1. řád. $\Lambda = 2 \mu\text{m}$, $N = 10$.

4.7.3 Měření mřížek na AFM

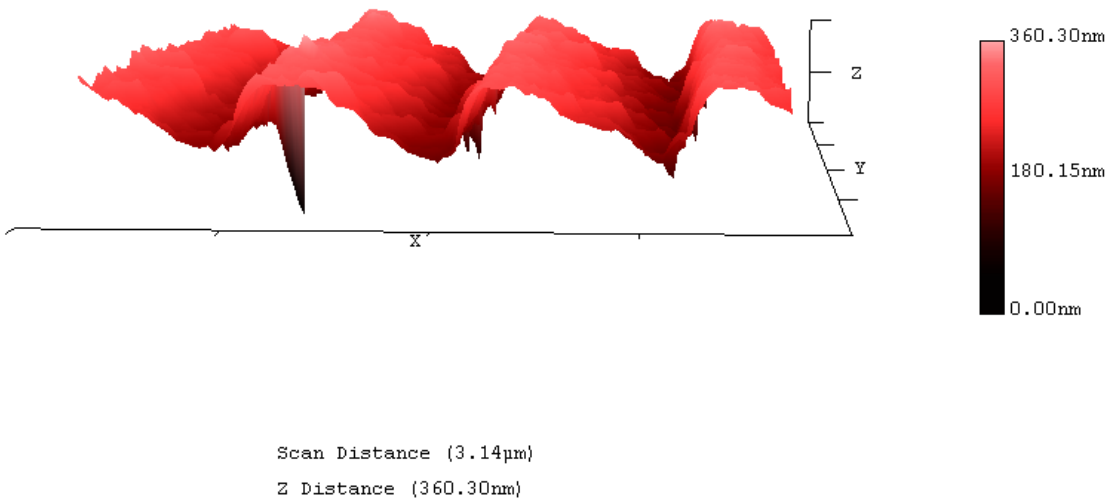
Všechny mřížky připravené v této práci byly změřeny na AFM. U reflexních mřížek byly měřeny přímo mřížky v rezistu (pokovené tenkou vrstvou Ag). Naopak transmisní mřížky byly měřeny po zreplicování do UV laku na skle. Měření na AFM má dva hlavní cíle. Prvním cílem je měření hloubky mřížek. Protože při měření blejzovaného profilu dochází ke konvoluci hrotu a navíc hrot nemůže „zajet“ na dno blejzu (kvůli svému tvaru - vliv spádové hrany), bude toto měření spíše orientační. Protože známe periodu a sklon funkční plochy (ve střední části, kde hrot AFM není ovlivněn spádovou hranou), můžeme pak dopočítat přibližnou hloubku mřížky. Přesné stanovení hloubky mřížek poskytne měření jejich řezů na SEM (viz 4.7.2).

V rámci této práce byly podrobně z hlediska hloubky vyhodnoceny pouze skeny reflexních 20lvl mřížek, protože u nich nebylo měření řezů na SEM dostatečně vyhovující.

Ukázka z měření je na obr. 4.19 a 3D sken mřížky na obr. 4.20. Hloubky 20lvl reflexních mřížek změřených na AFM jsou uvedeny v tab. 4.12.



Obr. 4.19: Ukázka měření sklonu funkční plochy na AFM. $\Lambda = 1 \mu\text{m}$, $N = 20$.



Obr. 4.20: 3D zobrazení skenu z AFM. $\Lambda = 1 \mu\text{m}$, $N = 20$.

Tab. 4.12: Porovnání naměřených hloubek 20lvi reflexních mřížek na AFM s hloubkou jejich designu. Pro každou hodnotu je uvedena rozšířená nejistota s užitím 95% konfidenčního intervalu Studentova rozdělení.

Perioda [μm]	Počet úrovní [-]	h_{design} [nm]	h_{SEM} [nm]
1	20	300,2	$208,79 \pm 09,87$
5	20	300,2	$314,58 \pm 35,61$
10	20	300,2	$350,37 \pm 38,72$

Druhým výstupem z měření na AFM je drsnost funkčních ploch (aritmeticky průměrované hodnoty výšky v dané ploše) - značí se R_{SA} . Výsledné hodnoty drsnosti jsou uvedeny v tab. 4.13.

Tab. 4.13: Naměřené hodnoty drsnosti funkčních ploch z AFM.

Reflexní mřížky, 1.řád		
Perioda [μm]	Počet úrovní [-]	R_{SA} [nm]
1	10	8,6
1	10	9,4
5	10	12,4
5	10	7,8
10	10	18,1
10	10	9,4

Transmisní mřížky, 1. řád		
Perioda [μm]	Počet úrovní [-]	R_{SA} [nm]
2	10	23,1
5	16	27,0
5	32	21,9
10	16	30,1
10	32	20,6

Transmisní mřížky, 2. řád		
Perioda [μm]	Počet úrovní [-]	R_{SA} [nm]
5	16	23,4
5	32	18,2
10	16	17,9
10	32	13,2

4.8 Vyhodnocení

4.8.1 Difrakční účinnost

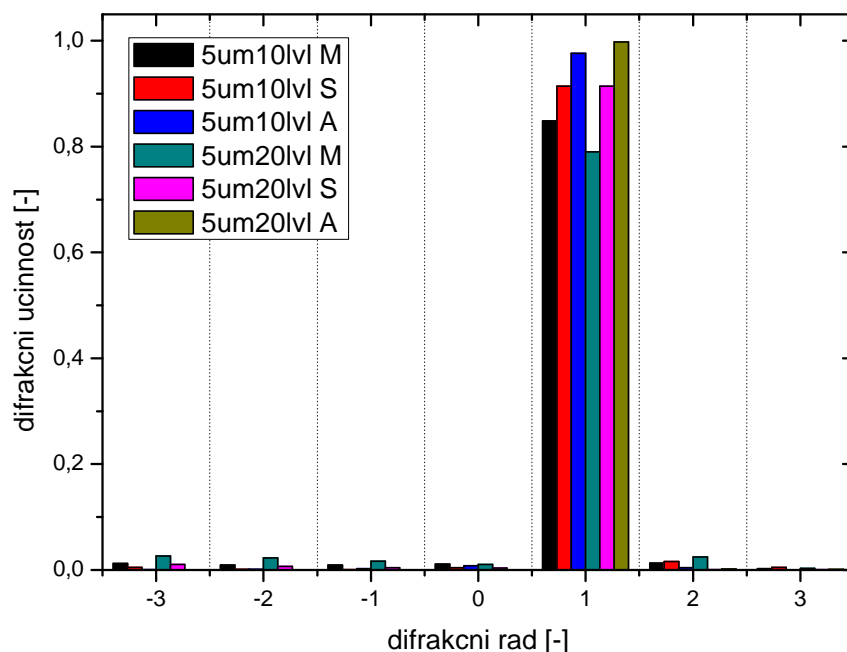
Nyní lze přistoupit k porovnání výsledků měření difrakční účinnosti (TE i TM polarizace) a hodnoty získaných numerickou simulací (TE i TM polarizace, GSolver) a analytickým výpočtem (pouze TE polarizace, viz 3). Podkladem pro simulace a analytický výpočet v této části jsou hloubky mřížek změřené na SEM (viz 4.7.2) nebo AFM (viz. 4.7.3). Níže jsou uvedeny grafy (4.21 - 4.26) pro 5 μm mřížky všech typů a pro obě polarizace. Grafy pro zbylé mřížky jsou uvedeny v příloze D.

Vysvětlení zkratk v legendě:

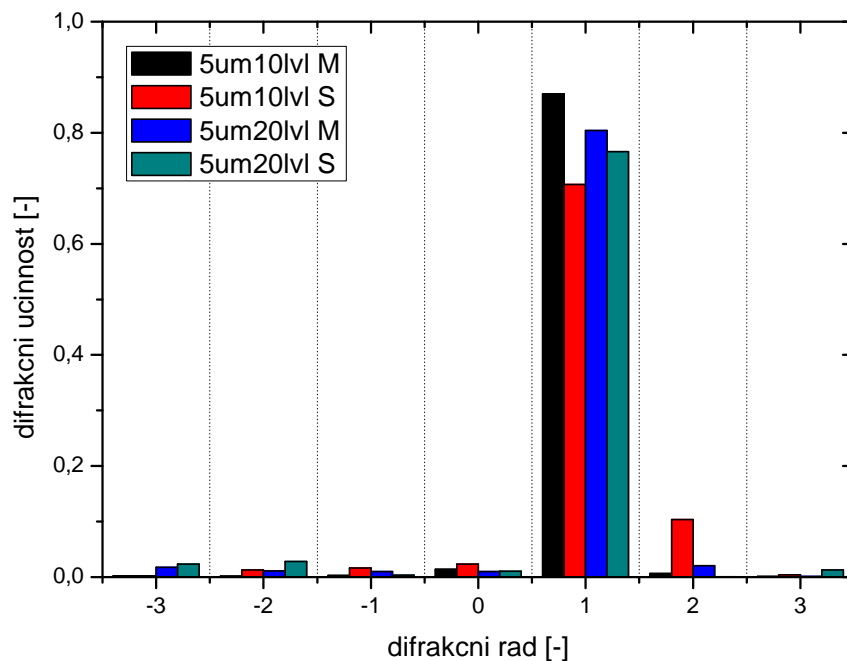
M – měření,

S – simulace v GSolver,

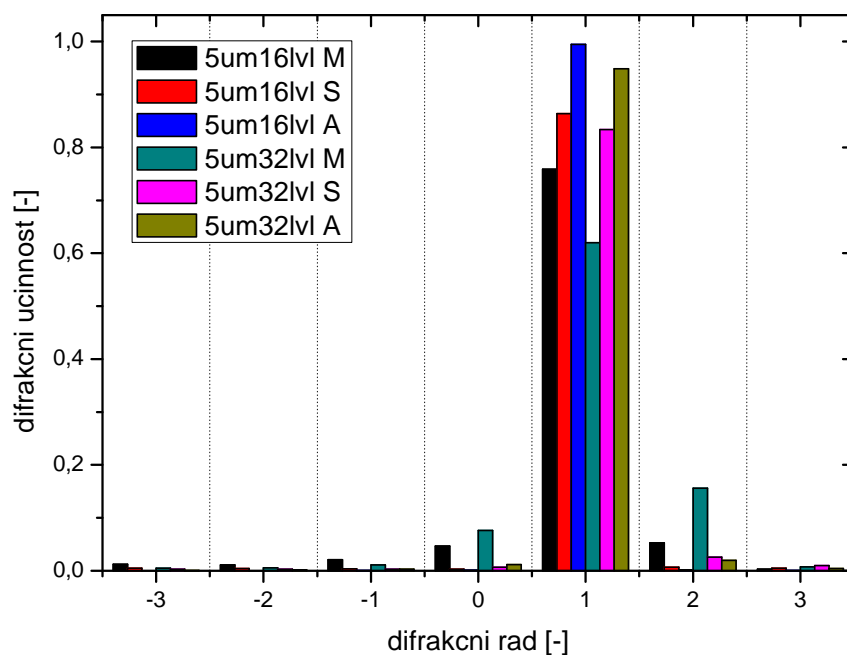
A – analytický výpočet.



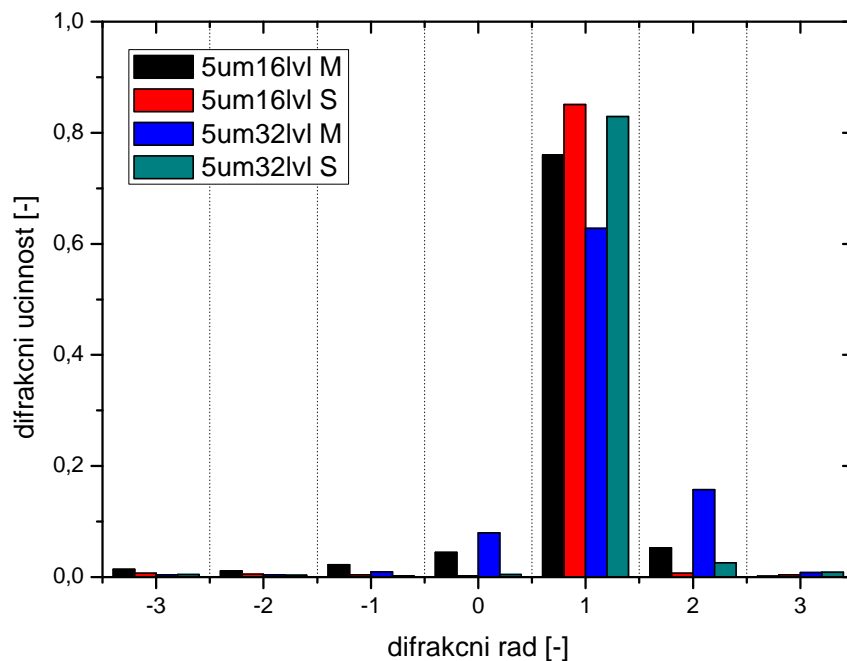
Obr. 4.21: Porovnání difrakčních účinností jednotlivých řádů reflexní blejzované mřížky naladěné na první řád ($\Lambda = 5 \mu\text{m}$, $N = 10$ a $N = 20$) pro TE polarizaci dopadajícího světla.



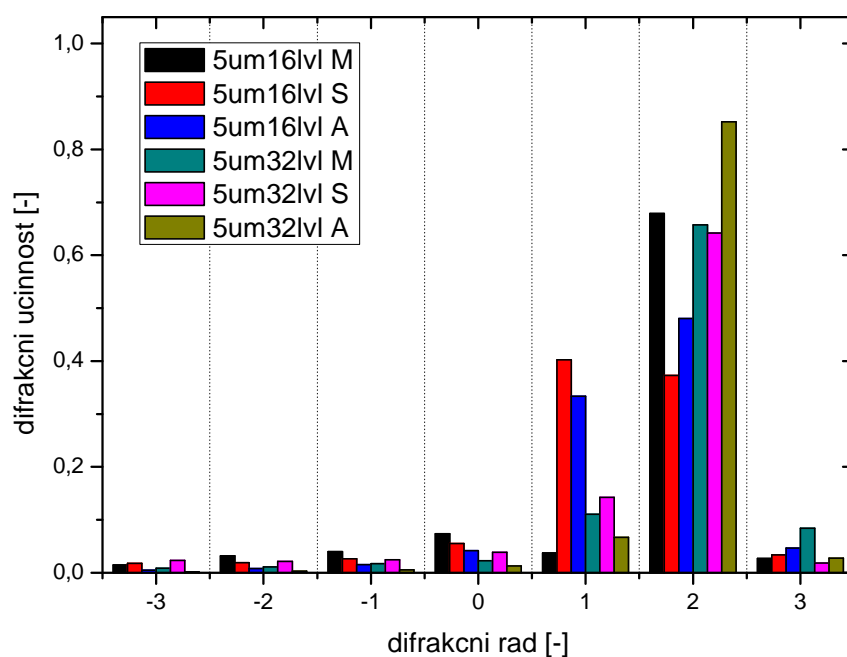
Obr. 4.22: Porovnání difrakčních účinností jednotlivých řádů reflexní blejzované mřížky naladěné na první řád ($\Lambda = 5 \mu\text{m}$, $N = 10$ a $N = 20$) pro TM polarizaci dopadajícího světla.



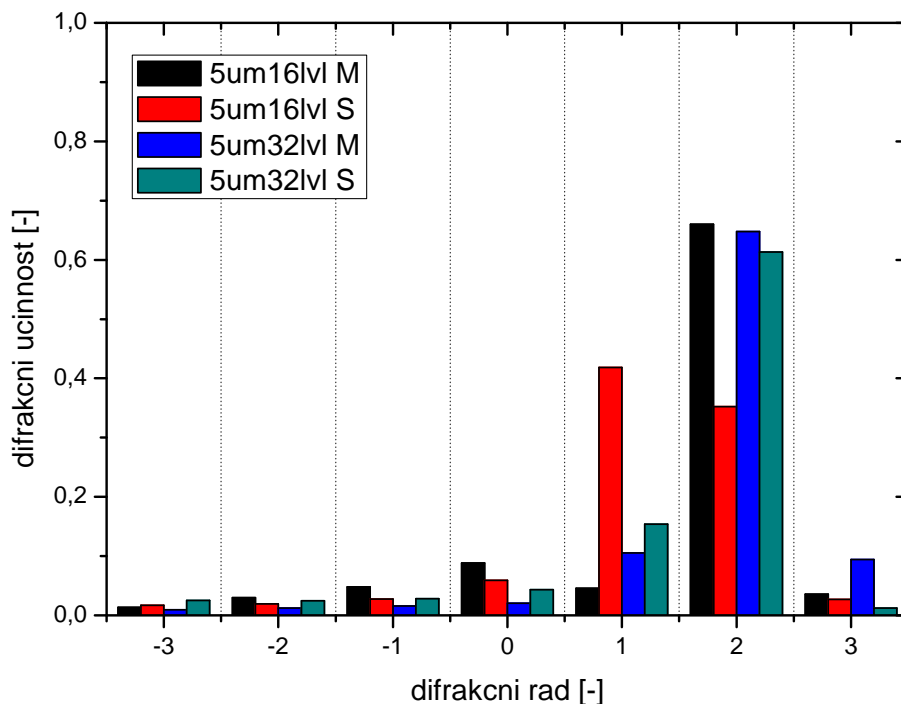
Obr. 4.23: Porovnání difrakčních účinností jednotlivých řádů transmisní blejzované mřížky naladěné na první řád ($\Lambda = 5 \mu\text{m}$, $N = 16$ a $N = 32$) pro TE polarizaci dopadajícího světla.



Obr. 4.24: Porovnání difrakčních účinností jednotlivých řádů transmisní blejzované mřížky naladěné na první řád ($\Lambda = 5 \mu\text{m}$, $N = 16$ a $N = 32$) pro TM polarizaci dopadajícího světla.



Obr. 4.25: Porovnání difrakčních účinností jednotlivých řádů transmisní blejzované mřížky naladěné na druhý řád ($\Lambda = 5 \mu\text{m}$, $N = 16$ a $N = 32$) pro TE polarizaci dopadajícího světla.



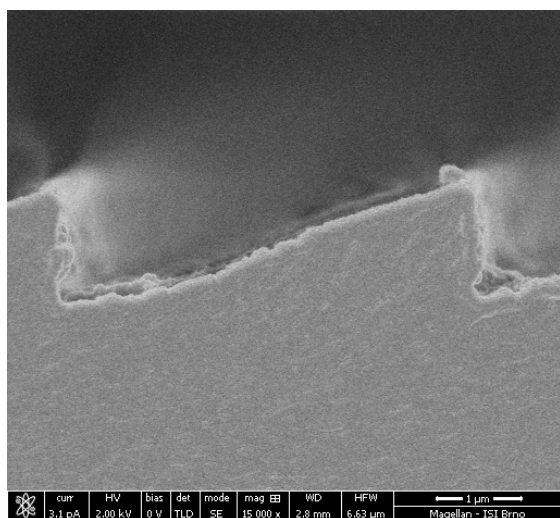
Obr. 4.26: Porovnání difrakčních účinností jednotlivých řádů transmisní blejzované mřížky naladěné na druhý řád ($\Lambda = 5 \mu\text{m}$, $N = 16$ a $N = 32$) pro TM polarizaci dopadajícího světla.

Podle teoretických předpokladů by hodnoty difrakční účinnosti v požadovaném řádu (získané různou metodou) měly odpovídat pro TE polarizace následujícímu: $\eta_M < \eta_S < \eta_A$. Toto tvrzení je splněno pro reflexní a transmisní mřížky laděné na první řád. U transmisních mřížek laděných na druhý řád neplatí a dokonce u některých mřížek naměřená hodnota převyšuje hodnotu spočítanou analyticky. Pro TM polarizaci lze vyslovit obdobný předpoklad: $\eta_M < \eta_S$. Tento předpoklad je splněn pouze u transmisních mřížek naladěných na první řád, u ostatních mřížek splněn není. To může být zapříčiněno např. nepřesným nastavením polarizace laseru při měření.

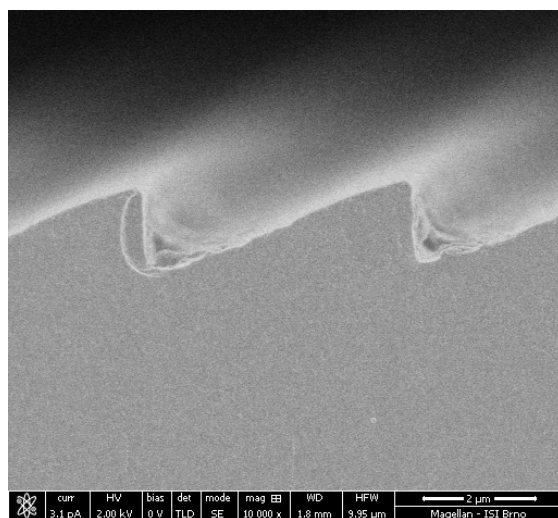
I přesto, že se místy hodnoty získané měřením a simulací výrazně liší, celkový součet intenzity v jednotlivých řádech zůstává přibližně stejný (mění se distribuce intenzity do jednotlivých řádů). Toto oslabení difrakční účinnosti preferovaného difrakčního řádu na úkor ostatních (převážně sousedních) může být zapříčiněno zkreslením profilu (různě prohnutá funkční hrana) - viz 4.8.2. Poměrně překvapivým poznatkem je to, že u naměřených hodnot neplatí, že vyšší počet úrovní zaručuje vyšší účinnost. Důvodem může být prohnutí horní částí funkční hrany, které se výrazněji projevuje u mřížek s více úrovněmi (podrobně v 4.8.2).

4.8.2 Analýza profilu - planarita funkční hrany

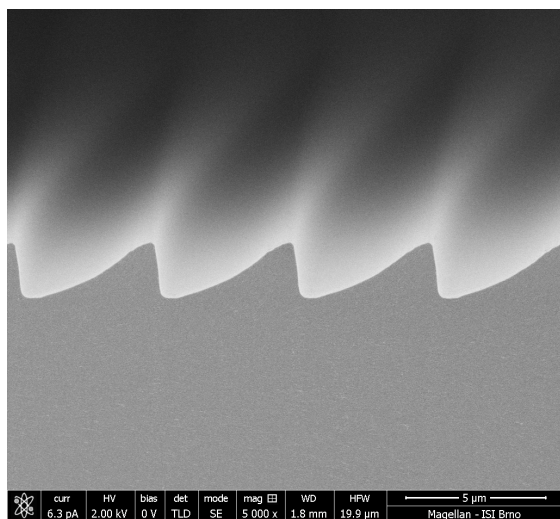
Měření řezů na SEM umožňuje zobrazení reálných profilů blejzovaných mřížek. Pro ilustraci budou uvedeny snímky profilů mřížek, které byly rozebrány v 4.8.1 s výjimkou reflexní mřížky (při malé hloubce a periodě $5\text{ }\mu\text{m}$ je profil v řezu špatně zřetelný). Na obr. 4.27 jsou zachyceny snímky řezů $5\text{ }\mu\text{m}$ mřížek pořízené na SEM.



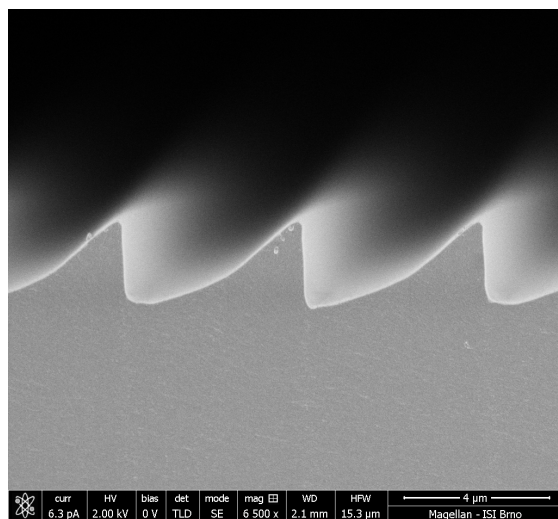
(a) $\Lambda = 5\text{ }\mu\text{m}$, $N = 16$, 1. řád



(b) $\Lambda = 5\text{ }\mu\text{m}$, $N = 32$, 1. řád



(c) $\Lambda = 5\text{ }\mu\text{m}$, $N = 16$), 2. řád



(d) $\Lambda = 5\text{ }\mu\text{m}$, $N = 32$), 2. řád

Obr. 4.27: SEM snímky řezů blejzovaných mřížek.

Z porovnání snímků řezů transmisních blejzovaných mřížek laděných na první řád je vidět, že s vyšším počtem vrstev je funkční hrana „vyhlazenější“. Dále je zřetelné, že pro více úrovní dochází později k zakřivení hrany u dna. Dle těchto poznatků se tedy více blíží ideálnímu profilu mřížka s více úrovněmi, tudíž by měla mít vyšší difrakční účinnost v preferovaném řádu. Difrakční účinnost v prvním řádu

byla naměřena vyšší (TE – obr.4.23 i TM – 4.24 polarizace) pro mřížky s nižším počtem úrovní. Zde je však nutné si uvědomit, že nemůžeme posuzovat pouze hodnoty difrakční účinnosti, která je závislá na hloubce mřížky, bez uvážení simulovaných hodnot. Simulace provedená pro naměřené hloubky vlastně říká, jaká by byla účinnost ideálního profilu s daným počtem úrovní o této hloubce. Správným postupem je tedy srovnání naměřené a odsimulované hodnoty v preferovaném řádu pro mřížku s jedním počtem úrovní a následně stejným způsobem porovnat s mřížkou s jiným počtem úrovní. Na obr. 4.23 je vidět, že větší rozdíl mezi hodnotami M a S je u mřížky s $N = 32$. Z toho plyne, že tato mřížka má určitou nedokonalost profilu funkční hrany. Při důkladném prohlédnutí obr. 4.27 b) je vidět, že tato mřížka má v horní části funkční hrany mírně vypouklé prohnutí vůči ideálnímu profilu. To je možné vysvětlení, proč je intenzita v preferovaném prvním řádu nižší. Dále je vidět, že tento úbytek se projevil zvýšením intenzity sousedících řádů (nultý a druhý). Jako pravděpodobný závěr se nabízí tvrzení, že prohnutí funkční hrany blíže vrcholu blejzu má na účinnost preferovaného řádu větší vliv než zakřivení u jeho paty.

Ze snímků mřížek laděných na druhý řád je zřejmé, že u těchto hlubších mřížek je profil značně zkreslený (obr. 4.27 c) a d)). Navíc zkreslení není typově stejné v celém profilu. V horní části funkční hrany je profil planární, ale má větší sklon, než by měl mít podle návrhu. V dolní části je zřetelné mírné prohnutí a celkově má dolní část sklon mírnější. Následkem toho přibližně v půlce funkční hrany vzniká „bod zlomu“, kde se mění charakter zkreslení hrany. Tento jev je výraznější pro mřížku s více úrovněmi. Může tedy docházet ke snížení difrakční účinnosti požadovaného řádu, opět ve „prospěch“ okolních řádů – viz obr. 4.25.

Vyhodnocení planarity funkční hrany reflexních mřížek je komplikovanější, protože snímky ze SEM pro 20lvl mřížky nejsou dostatečně vypovídající. V případě velmi mělkých reliéfů se totiž špatně vyhodnocuje pracovní hrana. Proto u těchto mřížek použijeme pro vyhodnocení skeny z AFM. Výše bylo zmíněno, že tyto skeny rozhodně nepodají přesnou informaci o profilu na krajích funkční hrany (konvoluce, vliv spádové hrany na hrot). Nicméně ve střední části hrany by měření mělo být přesné. Z obr. 4.21 je vidět, že 10lvl i 20lvl mřížky mají poměrně vysokou difrakční účinnost v požadovaném řádu (80 - 90 %). Opět je však nižší pro víceúrovňové mřížky. Tento úbytek je tentokrát rozdělen nejen mezi dva sousedící řády (pravděpodobně opět vliv nějakého zkreslení či prohnutí funkční plochy), ale také do všech řádů na opačné straně od normály mřížky (řády se záporným znaménkem) - viz 4.8.3.

4.8.3 Analýza profilu - strmost spádové hrany

K měření strmosti spádové hrany byly použity snímky řezů mřížek ze SEM, přičemž měření bylo provedeno v programu ImageJ. Změřeny byly pouze mřížky s dostatečně vypovídajícím profilem. Výsledky jsou uvedeny v tab. 4.14.

Tab. 4.14: Naměřené hodnoty sklonu spádových hran mřížek. Pro každou hodnotu je uvedena rozšířená nejistota s užitím 95% konfidenčního intervalu Studentova rozdělení.

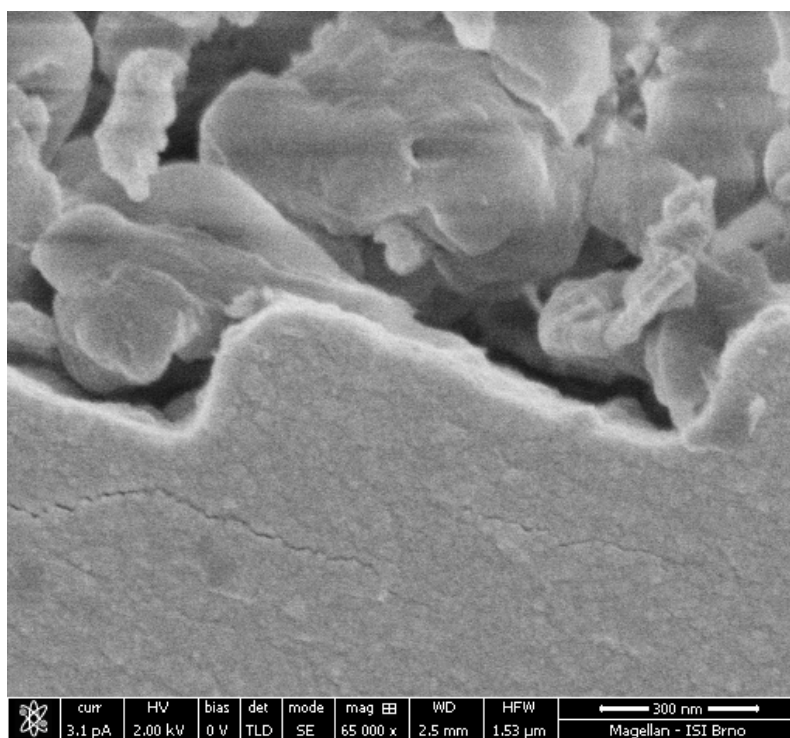
Reflexní, 1. řád		
Perioda [μm]	Počet úrovní [-]	Sklon spádové hrany [$^{\circ}$]
1	10	$72,03 \pm 1,75$
5	10	$75,75 \pm 1,50$
10	10	$69,29 \pm 0,89$

Transmisní, 1. řád		
Perioda [μm]	Počet úrovní [-]	Sklon spádové hrany [$^{\circ}$]
2	10	$83,81 \pm 0,69$
5	32	$86,79 \pm 0,47$

Transmisní, 2. řád		
Perioda [μm]	Počet úrovní [-]	Sklon spádové hrany [$^{\circ}$]
5	16	$82,37 \pm 0,29$
5	32	$85,25 \pm 0,27$
10	16	$86,96 \pm 0,19$
10	32	$87,26 \pm 0,19$

Z tab. 4.14 je zřejmé, že nejmenší sklon spádové hrany mají reflexní mřížky. U transmisních mřížek se jedná o vyšší hodnoty (blížíci se ideálnímu sklonu 90°). Dále je vidět, že větší počet úrovní vede k vyššímu sklonu spádové hrany. To je pravděpodobně způsobeno přesnějším definováním jednotlivých vrstev na obou stranách od hranice mezi poslední a první úrovní. Dále se zde může projevit vliv korekčního členu (hranatá závorka) ze vztahů 3.5 a 3.8, v jehož důsledku požadovaná hloubka poslední úrovně roste s větším počtem použitých vrstev. Následkem toho jsou pro poslední vrstvy mřížek s různým počtem úrovní použity různé dávky (větší požadovaná hloubka \Rightarrow vyšší dávka). Tedy pro mřížky s více úrovněmi je rozdíl mezi dávkou první a poslední vrstvy větší (tzn. větší gradient dávky). To má za následek větší sklon spádové hrany. Rozdíl mezi reflexními a transmisními mřížkami je pravděpodobně opět způsoben odlišným gradientem dávek.

To, jak moc se nižší sklon spádové hrany projeví na výsledné difrakční účinnosti, lze ukázat srovnáním obr. D.1 (reflexní mřížka, 1. řád; $\Lambda = 1$, $N = 10$) a obr. 4.21 (reflexní mřížka, 1. řád; $\Lambda = 5$, $N = 10$). Vidíme, že rozdělení celkové intenzity pro $5\mu\text{m}$ mřížku odpovídá asymetrickému blejzovanému profilu, zatímco pro $1\mu\text{m}$ se podobá spíše symetrickému pilovitému profilu. S přihlédnutím k přibližně stejnému sklonu spádové hrany pro obě mřížky (viz tab. 4.14) lze vyvodit závěr, že vliv sklonu spádové hrany na difrakční účinnost mřížky je nepřímo úměrný její periodě (menší perioda \Leftrightarrow větší vliv). Tuto závislost lze odůvodnit tak, že u malých period zabírá spádová hrana větší procentuální část periody než u velkých. Konkrétně pro mřížku s periodou $1\mu\text{m}$ ($N = 10$) zabírá spádová hrana přibližně $1/5$ periody, funkční hrana $4/5$ periody (viz obr. 4.28). Spádová hrana pak funguje tak trochu jako nežádoucí funkční hrana a směřuje část intenzity do řádů s opačným znaménkem než má řád preferovaný. Pokud by se poměr mezi funkční a parazitní hranou v rámci periody vyrovnal, vznikla by tak mřížka se symetrickým pilovitým profilem.



Obr. 4.28: Snímek řezu reflexní mřížky s nízkým sklonem spádové hrany ($\Lambda = 1$, $N = 10$) na SEM.

4.8.4 Analýza profilu - zaoblení u paty blejzu a vrcholu blejzu

Posledním vyhodnocovaným znakem v rámci analýzy profilu mřížek je zaoblení profilu u paty a vrcholu blejzu. Pro mřížku určitého typu (reflexní apod.) naladěnou na stejný řád je závislost hloubky mřížky na počtu úrovní úměrná korekčnímu členu v rovnicích 3.5 a 3.8. Z těchto vztahů je také dobře čitelné, že požadovaná hloubka není na periodě závislá. Poloměr křivosti (poloměr nejmenší možné kružnice vepsané mezi funkční a parazitní hranu) je tedy závislý na sklonu funkční hrany (ten je úměrný podílu hloubky a periody). Pro měření byl opět použit program ImageJ a jako podklad posloužily snímky řezů mřížek ze SEM. Poloměry křivosti zaoblení u vrcholu blejzů jsou v rozsahu $r_v \approx 70 - 110$ nm. Poloměry křivosti zaoblení u paty blejzů spadají do rozsahu $r_p \approx 100 - 400$ nm. Pro oba platí, že jsou nepřímo úměrné sklonu funkční plochy mřížky – větší sklon (malá perioda) \Rightarrow menší poloměr křivosti zaoblení. Zaoblení je úzce svázáno se strmostí spádové hrany. Pokud se strmost spádové hrany blíží k 90° (ideální profil), pak bude poloměr křivosti zaoblení malý a naopak. Zaoblení je tedy svázáno s ostatními parametry mřížky a zjednodušeně ho můžeme považovat za vlastnost strmosti spádové hrany (viz 4.8.3).

4.8.5 Drsnost funkční plochy

Drsnost funkční plochy vychází v řádu jednotek až dvou desítek nanometrů, což je pod rozlišovací schopností použitého laseru ($\lambda = 635$ nm) a vliv na difrakční účinnost je tedy minimální. Naměřené hodnoty drsnosti v tab. 4.13 tedy spíše slouží pro doplnění analýzy kvalitativních znaků mřížek.

5 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývala studiem vyhlazených asymetrických mřížek vytvořených elektronovou litografií. V teoretické části byla provedena rešerše, která je rozdělená do dvou kapitol - Elektronová litografie a Asymetrické difrakční mřížky. První kapitola je především zaměřena na interakce elektronového svazku s rezistem, které následně ovlivňují kvalitu expozice. Dále se tato kapitola zabývala procesem reliéfní elektronové litografie. V druhé kapitole je provedena studie o reflexních a transmisních blejzovaných mřížkách.

Experimentální část se zabývá kompletním postupem přípravy reflexních a transmisních asymetrických difrakčních mřížek. Nejprve byly ověřeny teoretické předpoklady porovnáním analytického výpočtu dle teorie a numerické simulace v programu GSolver. Následně byly připraveny testy citlivosti pro získání křivek citlivostí. Dále byly vytvořeny skripty v MATLABu pro generování struktur mřížek. Za užití křivek citlivostí byly vypočítány korekce proximity efektu, které byly použity pro přípravu expozičních dat. Expozice byly s ohledem na požadovaný účel mřížky (reflexní na 1. řád; transmisní na 1. řád a transmisní na 2. řád) provedeny do různých typů PMMA.

Příprava vzorků pro měření difrakční účinnosti byla odlišná pro reflexní a transmisní mřížky. V případě reflexních mřížek byly pokoveny struktury vytvořené v rezistu tenkou vrstvou stříbra. Transmisní mřížky byly s užitím silikonového otisku zreplikovány do transparentního UV laku na skleněný substrát. Měření na AFM proběhlo vždy na stejném vzorku jako měření difrakční účinnosti (reflexní - pokovené mřížky v rezistu, transmisní - zreplikované mřížky na skle). Pro měření na SEM byly připraveny řezy mřížek, které byly následně pokoveny tenkou vrstvou chromu.

Cílem měření řezů mřížek na SEM bylo stanovení jejich hloubky a zobrazení/zanalyzování jejich reálného profilu (pořízení snímku). Měřením na AFM byly získány hloubky mřížek, u kterých s ohledem na jejich vlastnosti (mělký reliéf) nebylo měření na SEM vypovídající. Měření na AFM dále poskytlo informaci o drsnosti povrchu funkčních ploch mřížek. Pro reálné hloubky získané měřením na SEM (u části mřížek na AFM) byl znovu proveden teoretický výpočet a numerická simulace účinností jednotlivých difrakčních řádů. Následně byly takto získané hodnoty srovnány s reálně naměřenými difrakčními účinnostmi. V rámci analýzy profilu mřížek byly popsány a vyhodnoceny kvalitativní charakteristiky mřížek: planarita funkční hrany, strmost spádové hrany, zaoblení hran u paty a dna blejzu. Na závěr byl diskutován možný vliv těchto znaků na výslednou difrakční účinnost mřížek.

Další práce v tomto směru by se mohla zabývat vylepšením parametrů difrakčních účinností jednotlivých mřížek. Pro optimální naladění mřížek by bylo nutné provést několik iterací expozic a u každé mřížky individuálně ošetřit její vady v pro-

filu. Dále by bylo vhodné u většiny mřížek optimalizovat použité dávky s ohledem na dosažené hloubky (např. transmisní mřížky naladěné na první řád s malou periodou byly mělké, transmisní mřížky naladěné na první řád s velkou periodou hluboké). Dále by se mohl u mřížek s malou periodou použít menší základní krok svazku BSS - tedy získání lepšího mezního rozlišení. U reflexních mřížek by bylo možné upravit sklon spádové hrany navýšením počtu úrovní a úpravou expozičních dávek. U transmisních mřížek v mělkém i hlubokém rezistu by bylo možné provést korekce expozičních dávek tak, aby funkční plocha byla planární. Po provedení těchto úprav by bylo možné v rámci jedné expozice připravit lépe naladěné mřížky různých typů (pokud by to dovolily vlastnosti rezistu).

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MATĚJKA, F. *Praktická elektronová litografie*. Vyd. 1. Brno: Ústav přístrojové techniky AV ČR, 2013. ISBN 978-80-87441-04-6.
- [2] CUI, Z. *Nanofabrication: Principles, Capabilities and Limits*. New York: Springer, 2008. ISBN 978-0-387-75576-2.
- [3] KRÁTKÝ, S. *Studium vlastností periodických mřížek vytvořených elektronovou litografií* [online]. Brno, 2010 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=31053. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Milan Matějka.
- [4] DANĚK, L. *Reliéfní difraktivní struktury pro optické elementy realizované pomocí elektronové litografie* [online]. Brno, 2009 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=22317. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Doc. Ing. Vladimír Kolařík, Ph.D.
- [5] Diffraction gratings. HORIBA Scientific [online]. Kyoto: Horiba, 2016 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <http://www.horiba.com/scientific/products/optics-tutorial/diffractiongratings/>
- [6] VIEU, C., F. CARCENAC, A. PÉPIN, et al. Electron beam lithography: resolution limits and applications. *Applied Surface Science* [online]. 2000, **164**(1-4), 111-117 [cit. 2016-04-10]. DOI: 10.1016/S0169-4332(00)00352-4. ISSN 01694332. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169433200003524>
- [7] KRÁTKÝ, S., M. URBÁNEK a V. KOLAŘÍK. PEC Reliability in 3D E-beam DOE Nanopatterning. *Microscopy and Microanalysis*. 2015, **21**(S4), 230-235. DOI: 10.1017/S1431927615013422. ISSN 1431-9276. Dostupné z: http://www.journals.cambridge.org/abstract_S1431927615013422
- [8] BRUNN, O. Příprava fázových mřížek v submikrometrovém rozlišení. Brno, 2015. Semestrální projekt. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Stanislav Krátký.
- [9] KRÁTKÝ, S. *Kombinovaná elektronová litografie*. Brno, 2014.
- [10] KRÁLÍČEK, J. a A. V. JELCOV. *Litografické techniky*. 1. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1988.

- [11] DELONG, A. a V. MUSIL. *Elektronová a iontová technika*. První. Brno: Rektorát VUT v Brně, 1987.
- [12] KYSER, D. F. Monte Carlo simulation of spatially distributed beams in electron-beam lithography. *Journal of Vacuum Science and Technology*. 1975, **12**(6), 1305-1308 [cit. 2016-05-02]. DOI: 10.1116/1.568524. ISSN 00225355. Dostupné také z: <http://scitation.aip.org/content/avs/journal/jvst/12/6/10.1116/1.568524>
- [13] HAUPTMANN, M., K.-H. CHOI, P. JASCHINSKY, C. HOHLE, J. KRETZ a L.M. ENG. Determination of proximity effect parameters by means of CD-linearity in sub 100nm electron beam lithography. *Microelectronic Engineering* [online]. 2009, **86**(4-6), s. 539-543 [cit. 2016-05-29]. DOI: 10.1016/j.mee.2008.12.053. ISSN 01679317. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167931708006771>
- [14] ŠULAN, D. *Stanovení křivek citlivosti pro litograf s gaussovským svazkem* [online]. Brno, 2014 [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=88372. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Stanislav Krátký.
- [15] OWEN, G. Methods for proximity effect correction in electron lithography. *Journal of Vacuum Science* [online]. 1990, **8**(6), 1889-1892 [cit. 2016-05-04]. DOI: 10.1116/1.585179. ISSN 0734211x. Dostupné z: <http://scitation.aip.org/content/avs/journal/jvstb/8/6/10.1116/1.585179>
- [16] KRAATS, A. van de a R. MURALI. Proximity Effect in E-beam Lithography. In: *Nanolithography* [online]. Georgia: Georgia Institute of Technology, s. 1-12 [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://nanolithography.gatech.edu/proximity.pdf>
- [17] COOK, B.D. a L. SOO-YOUNG. PYRAMID-a hierarchical, rule-based approach toward proximity effect correction. II. Correction. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing* [online]. 1998, **11**(1), 117-128 [cit. 2016-05-04]. DOI: 10.1109/66.661291. ISSN 08946507. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=661291>
- [18] UNAL, N., D. MAHALU, O. RASLIN, D. RITTER, Ch. SAMBALE a U. HOFMANN. Third dimension of proximity effect correction (PEC). *Microelectronic Engineering* [online]. 2010, **87**(5-8), 940-942 [cit. 2016-05-08]. DOI: 10.1016/j.mee.2009.12.002. ISSN 01679317. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167931709008363>

- [19] Resists for lift off. *Center of micronanotechnology CMI* [online]. Lausanne, 2010 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <https://cmi.epfl.ch/ebeam/resistLiftOff.php?page=process>
- [20] BRUNN, O. *Elektronová litografie* [online]. Brno, 2013 [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: <https://socv2.nidv.cz/archiv35/getWork/hash/83d7bf928b0b11e2-b1f8faa932cbcfda>. Středoškolská odborná činnost. Gymnázium, Brno, tř. Kapitána Jaroše 14. Vedoucí práce Ing. Stanislav Krátký.
- [21] MILER, M. *Fyzika a holografické difrakční struktury* [online]. Praha: Jednota československých matematiků a fyziků, 1988 [cit. 2016-05-08]. ISBN (brož.). Dostupné z: <http://www.opto.cz/miler/index.html#TOC1>
- [22] DAVIDSON, N., R. DUER, A. A. FRIESEM a E. HASMAN. Blazed holographic gratings for polychromatic and multidirectional incidence light. *Journal of the Optical Society of America A* [online]. 1992, **9**(7), 1196- [cit. 2016-05-09]. DOI: 10.1364/JOSAA.9.001196. ISSN 1084-7529. Dostupné z: <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=josaa-9-7-1196>
- [23] OLIVA, M. *High efficiency blazed gratings in resonance domain* [online]. Jena, 2014 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: http://www.db-thueringen.de/servlets/DerivateServlet/Derivate-32881/Diss/Oliva_Dissertation_Bilio.pdf. Dizertační práce. Friedrich-Schiller-Universität Jena.
- [24] KUITTINEN, M, H.P HERZIG a P EHBETS. Improvements in diffraction efficiency of gratings and microlenses with continuous relief structures. *Optics Communications* [online]. 1995, **120**(5-6), 230-234 [cit. 2016-05-25]. DOI: 10.1016/0030-4018(95)00510-F. ISSN 00304018. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/003040189500510F>
- [25] SWANSON, G. J. *Binary Optics Technology: The Theory And Design of Multi-level Diffractive Optical Elements* [online]. Lexington, Massachusetts, 1989 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a213404.pdf>
- [26] FLUCKIGER, D. *GSolver Version 5.2 User's Guide: 7th Edition*. In: *GSolver: Rigorous Diffraction Grating Analysis* [online]. Texas: Grating Solver Development Company, 2012 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://www.gsolver.com/UserManual.pdf>

SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Závislost hustoty absorbované energie E_a na penetrační hloubce z v elektronovém rezistu PMMA (polymethylmethakrylát) při expoziční dávce $10 \mu\text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$ pro tři různé energie primárních elektronů, převzato z [3, s. 21].	17
2.2	Závislost veličiny σ popisující boční rozptyl elektronů na penetrační hloubce pro různé energie primárních elektronů, podle [1, s. 7]	18
2.3	Simulované trajektorie elektronů vycházejících z bodového zdroje pro energie a) 10 keV, b) 20 keV; převzato (graficky upraveno) z [12]. . .	20
2.4	Numerický model PSF funkce a její Gaussova aproximace, převzato (graficky upraveno) z [14, s. 19]	21
2.5	Modulační přenosová funkce v závislosti na periodě exponovaných čar v rezistu PMMA tloušťky 500 nm pro různé energie primárních elektronů, převzato (graficky upraveno) z [9, s. 7]	22
2.6	Schéma zápisu motivu do pozitivního a negativního rezistu	25
2.7	Nanášecí křivka elektronového rezistu PMMA 495K A8. Prevzato (upraveno) z [19].	27
3.1	Ideální profil reflexní blejzované mřížky. Prevzato (upraveno) z [21]. .	32
3.2	Srovnání účinnosti difrakčních řádů pro reflexivní mřížky s různou periodou. Vypočteno (dle vztahu 3.2) pro kolmý dopad a hloubku podle 3.4 pro $\lambda_{opt} = 635 \text{ nm}$	33
3.3	Srovnání ideálního profilu s reálným profilem ($N = 4$).	34
3.4	Schematický náčrt ideálního profilu transmisní blejzované mřížky. Prevzato (upraveno) z [23, s. 6-7].	35
4.1	Schéma experimentální části.	38
4.2	Teoretický výpočet difrakčních účinností jednotlivých řádů pro reflexivní mřížky naladěné na první řád.	39
4.3	Teoretický výpočet difrakčních účinností jednotlivých řádů pro transmisní mřížky naladěné na první řád.	40
4.4	Teoretický výpočet difrakčních účinností jednotlivých řádů pro transmisní mřížky naladěné na druhý řád.	40
4.5	Okno programu GSolver pro nastavení základních parametrů.	41
4.6	Okno GS4 editoru programu GSolver pro vytvoření profilu mřížky. . .	42
4.7	Okno GS4 editoru programu GSolver se 3D zobrazením zadaného profilu mřížky.	42
4.8	Výsledek simulace difrakčních účinností pro reflexivní blejzované mřížky naladěné na první řád. Pro index lomu materiálu je použit Drudeho model stříbra (rezist bude pokoven tenkou vrstvou stříbra).	43

4.9	Výsledek simulace difrakčních účinností pro transmisní blejzované mřížky naladěné na (a) první řád a (b) druhý řád. Jako index lomu materiálu je použita konstantní hodnota $n = 1,5$, která přibližně odpovídá UV laku Radcote, do kterého budou mřížky replikovány. Pro index lomu substrátu je použita tabulková hodnota pro sklo BK7, které bude použito v experimentu.	44
4.10	Závislost difrakční účinnosti prvního řádu transmisní blejzované (naladěné na první řád) mřížky na její hloubce. $\Lambda = 2 \mu\text{m}$, $N = 10$	45
4.11	Křivka citlivosti pro mělký rezist (PMMA, $w_0 = 2615 \text{ nm}$). Naměřené data jsou proloženy polynomem stupně 3. Vývojka IPA:H ₂ O, čas vyvolání $t_v = 180 \text{ s}$	46
4.12	Křivka citlivosti pro hluboký rezist (PMMA, $w_0 = 7974 \text{ nm}$). Naměřená data jsou proloženy polynomem stupně 4. Vývojka IPA:H ₂ O, čas vyvolání $t_v = 30 \text{ s}$	47
4.13	Způsob přípravy a zápisu blejzovaných mřížek demonstrováný na čtyřúrovňové struktuře.	48
4.14	Návrh standardní blejzované mřížky, $\Lambda = 5 \mu\text{m}$, $N = 16$. Snímek z prostředí Layout BEAMER VIEWER.	48
4.15	Uspořádání modulů v grafickém prostředí Layout BEAMER pro výpočet korekce proximity efektu.	49
4.16	Výsledek výpočtu modulu 3D-PEC pro transmisní blejzovanou mřížku naladěnou na první řád s parametry: $\Lambda = 5 \mu\text{m}$ a $N = 16$. (a) Celé pole (rozměr $200 \times 200 \mu\text{m}$). (b) Detail o velikosti jedné periody s ukázkou odečtení expoziční dávky pro úroveň č. 8.	50
4.17	Uspořádání modulů v grafickém prostředí Layout BEAMER pro přiřazení dávek a export expozičních souborů.	52
4.18	Měření hloubky mřížky na SEM. Transmisní mřížka naladěná na 1. řád. $\Lambda = 2 \mu\text{m}$, $N = 10$	57
4.19	Ukázka měření sklonu funkční plochy na AFM. $\Lambda = 1 \mu\text{m}$, $N = 20$	58
4.20	3D zobrazení skenu z AFM. $\Lambda = 1 \mu\text{m}$, $N = 20$	58
4.21	Porovnání difrakčních účinností jednotlivých řádů reflexní blejzované mřížky naladěné na první řád ($\Lambda = 5 \mu\text{m}$, $N = 10$ a $N = 20$) pro TE polarizaci dopadajícího světla.	60
4.22	Porovnání difrakčních účinností jednotlivých řádů reflexní blejzované mřížky naladěné na první řád ($\Lambda = 5 \mu\text{m}$, $N = 10$ a $N = 20$) pro TM polarizaci dopadajícího světla.	61
4.23	Porovnání difrakčních účinností jednotlivých řádů transmisní blejzované mřížky naladěné na první řád ($\Lambda = 5 \mu\text{m}$, $N = 16$ a $N = 32$) pro TE polarizaci dopadajícího světla.	61

4.24	Porovnání difrakčních účinností jednotlivých řádů transmisní blejzované mřížky naladěné na první řád ($\Lambda = 5 \text{ }\mu\text{m}$, $N = 16$ a $N = 32$) pro TM polarizaci dopadajícího světla.	62
4.25	Porovnání difrakčních účinností jednotlivých řádů transmisní blejzované mřížky naladěné na druhý řád ($\Lambda = 5 \text{ }\mu\text{m}$, $N = 16$ a $N = 32$) pro TE polarizaci dopadajícího světla.	62
4.26	Porovnání difrakčních účinností jednotlivých řádů transmisní blejzované mřížky naladěné na druhý řád ($\Lambda = 5 \text{ }\mu\text{m}$, $N = 16$ a $N = 32$) pro TM polarizaci dopadajícího světla.	63
4.27	SEM snímky řezů blejzovaných mřížek.	64
4.28	Snímek řezu reflexní mřížky s nízkým sklonem spádové hrany ($\Lambda = 1$, $N = 10$) na SEM.	67

SEZNAM TABULEK

2.1	Dolet elektronů v materiálech pro odlišné energie primárních elektronů [1, s. 5]	17
2.2	Materiálové vlastnosti látek, částečně převzato z [1, s. 9].	19
2.3	Rozptylové koeficienty pro různé energie primárních elektronů při tloušťce rezistu 500 nm na křemíkovém substrátu. Hodnoty koeficientů β a η pro energie 20 - 100 keV získány experimentálně, ostatní extrapolací. Hodnoty koeficientu α jsou vypočtené. Hodnoty pro $E_a = 15 \text{ keV}$ jsou převzaty z [1], ostatní z [15]. Značení sjednoceno podle [1].	23
4.1	Přehled mřížek exponovaných do mělkého rezistu.	37
4.2	Přehled mřížek exponovaných do hlubokého rezistu.	37
4.3	Data pro transmisní blejzovanou mřížku naladěnou na první řád s parametry: $\Lambda = 5 \text{ }\mu\text{m}$ a $N = 16$, zapuštění 100 nm. Zkratky: lvl - číslo úrovně.	51
4.4	Přehled časů vyvolání jednotlivých expozic (vývojka vždy IPA:H ₂ O).	52
4.5	Difrakční účinnosti jednotlivých řádů reflexních blejzovaných mřížek naladěných na první řád, TE polarizace.	54
4.6	Difrakční účinnosti jednotlivých řádů reflexních blejzovaných mřížek naladěných na první řád, TM polarizace.	54
4.7	Difrakční účinnosti jednotlivých řádů transmisních blejzovaných mřížek naladěných na první řád, TE polarizace.	54
4.8	Difrakční účinnosti jednotlivých řádů transmisních blejzovaných mřížek naladěných na první řád, TM polarizace.	55
4.9	Difrakční účinnosti jednotlivých řádů transmisních blejzovaných mřížek naladěných na druhý řád, TE polarizace.	55
4.10	Difrakční účinnosti jednotlivých řádů transmisních blejzovaných mřížek naladěných na druhý řád, TM polarizace.	55
4.11	Porovnání naměřených hloubek mřížek na SEM s hloubkou jejich designu. Pro každou hodnotu je uvedena rozšířená nejistota s užitím 95% konfidenčního intervalu Studentova rozdělení. U mřížek, kde nebyl dostatečný počet vypovídajících snímků ze SEM není uvedena. ♣ - mřížky se zkresleným profilem (chyba expozice), nebudou nadále vyhodnocovány.	56
4.12	Porovnání naměřených hloubek 20lvl reflexních mřížek na AFM s hloubkou jejich designu. Pro každou hodnotu je uvedena rozšířená nejistota s užitím 95% konfidenčního intervalu Studentova rozdělení.	59
4.13	Naměřené hodnoty drsnosti funkčních ploch z AFM.	59

4.14 Naměřené hodnoty sklonu spádových hran mřížek. Pro každou hodnotu je uvedena rozšířená nejistota s užitím 95% konfidenčního intervalu Studentova rozdělení.	66
--	----

SEZNAM PŘÍLOH

A Skripty pro generování mřížek	83
A.1 Blejzovaná mřížka - obsahuje pouze jednu šířku úrovně	84
A.2 Blejzovaná mřížka - obsahuje dvě různé šířky úrovně	85
B Napočítané expoziční dávky	87
B.1 Reflexní mřížky, 1. řád	87
B.2 Transmisní mřížky, 1. řád	89
B.3 Transmisní mřížky, 2. řád	92
C Měření difrakční účinnosti	95
D Vyhodnocení - difrakční účinnost	99
D.1 Reflexní mřížky, 1. řád	99
D.2 Transmisní mřížky, 1. řád	102
D.3 Transmisní mřížky, 2. řád	104

A SKRIPTY PRO GENEROVÁNÍ MŘÍŽEK

S ohledem na to, že se jedná pouze o jisté přemostění (vygenerování mřížek pro následný postup), nejsou skripty doladěné. Chybí několik užitečných věcí - např. doplnění exportu přímo do souboru, doplnit nadřazený skript, který rozhodne, jestli použít skript s pouze jednou šířkou levelů nebo s dvěma různými apod. Případně tvorba standalone aplikace. Nicméně svůj účel tyto skripty splní.

A.1 Blejzovaná mřížka - obsahuje pouze jednu šířku úrovně

```
1  clc
2  clearvars
3
4  %prism generator korekce 50
5  %vstupni data
6  field.pcs= 50; %poet pol v expozici
7  field.dim.x= 3000; % x-rozmr pole m ky (um)
8  field.dim.y= 3000; % y-rozmr pole m ky (um)
9  field.space.x= 1000; % x-rozmr mezery mezi poli (um)
10 field.space.y= 1000; % y-rozmr mezery mezi poli (um)
11 x_0=0; %zacatek souradnic
12 y_0=0; %zacatek souradnic
13 unit='NM';
14 resolve=1; %rozliseni v nm
15 korekce=50; %korekce rozmeru na nasobky 50 nm mimo vrstvy 1
16
17 %frezovane
18 period=10; %perioda m ky (um)
19 periodnm=period*1000;
20 layers=20; %poet vrstev v m ce
21 layer.lin.inv=linspace(layers,1,layers);
22 layer.lin=linspace(1,layers,layers);
23 a=1;
24 data=1;
25 layer.thicknesses=linspace(period/layers,period,layers);
26 for i=layer.lin.inv
27     inkrement(a)=floor((periodnm(a)/i)/korekce);
28     periodnm(a+1)=periodnm(a)-(inkrement(a)*korekce);
29     a=a+1;
30 end
31 periodnmk=periodnm;
32 periodnm=periodnm(1:layers);
33 zbytek=periodnm(layers);
34 formatSpec='TEXTLIB 9.0.0\nUNIT %s\nRESOLVE %1.0f\nBEGLIB\n\n';
35 fprintf(formatSpec,unit,resolve)
36 for i=layer.lin
37     formatSpec='STRUCT per%1.0fur%1.0f\nLAYER %1.0f\nDATATYPE
38 %1.0f\nB %1.0f, %1.0f, %1.0f, %1.0f, %1.0f, %1.0f, %1.0f,
39 %1.0f, ENDB\nENDSTRUCT\n\n';
40     fprintf(formatSpec,period,i,i,data,periodnmk(layers+2-i)
41 ,y_0,periodnm(layers+1-i),y_0,periodnm(layers+1-i),
42 field.dim.y*1000,periodnmk(layers+2-i),field.dim.y*1000);
43 end
44 for i=layer.lin
45     formatSpec='STRUCT per%1.0fur%1.0freplication\nLAYER
46 %1.0f\nDATATYPE %1.0f\nAREF per%1.0fur%1.0f (%1.0f, %1.0f)
47 %0.0f (%0.0f, %0.0f) %0.0f (%0.0f,%0.0f)\nENDSTRUCT\n\n';
48     fprintf(formatSpec,period,i,i,data,period,i,x_0,y_0
49 ,field.dim.x/period,period*1000,y_0,1,x_0,field.dim.y*1000);
50 end
51 fprintf('ENDLIB\n');
```

A.2 Blejzovaná mřížka - obsahuje dvě různé šířky úrovně

```

1  clc
2  clearvars
3
4  %prism generator korekce 50
5  %vstupni data
6  field.pcs= 50; %poet pol v expozici
7  field.dim_x= 3000; % x-rozmr pole m ky (um)
8  field.dim_y= 3000; % y-rozmr pole m ky (um)
9  field.space_x= 1000; % x-rozmr mezery mezi poli (um)
10 field.space_y= 1000; % y-rozmr mezery mezi poli (um)
11 x_0=0; %zacatek souradnic
12 y_0=0; %zacatek souradnic
13 unit='NM';
14 resolve=1; %rozliseni v nm
15 korekce=50; %korekce rozmeru na nasobky 50 nm mimo vrstvy 1
16
17 %nefrezovane
18 period=20; %perioda m ky (um)
19 periodnm=period*1000;
20 layers=64; %poet vrstev v m ce
21 layer.lin_inv=linspace(layers,1,layers);
22 layer.lin=linspace(1,layers,layers);
23 a=1;
24 data=1;
25 layer.thicknesses=linspace(period/layers,period,layers);
26 for i=layer.lin_inv
27     inkrement(a)=floor((periodnm(a)/i)/korekce);
28     periodnm(a+1)=periodnm(a)-(inkrement(a)*korekce);
29     a=a+1;
30 end
31 periodnmk=periodnm;
32 periodnm=periodnm(1:layers);
33 zbytek=periodnm(layers);
34
35 %update 2015-12-10 rozdeleni sirek rovnomerne
36 inkrement_razeny=sort(inkrement);
37 prvni=inkrement_razeny(1);
38 posledni=inkrement_razeny(2);
39 inkrement_razeny=inkrement_razeny(3:layers);
40 index=(1:layers-2);
41 h=1;
42 g=1;
43 for i=index;
44     if inkrement_razeny(i)==inkrement_razeny(1);
45         A(h)=inkrement_razeny(1);
46         h=h+1;
47     else
48         B(g)=inkrement_razeny(layers-2);
49         g=g+1;
50     end
51 end
52 n_A=numel(A);
53 n_B=numel(B);
54 if h>g
55     n_vetsifrv=n_A;
56     n_mensifrv=n_B;
57     vetsifrv=A;
58     mensifrv=B;
59 else
60     n_mensifrv=n_A;
61     n_vetsifrv=n_B;
62     mensifrv=A;
63     vetsifrv=B;
64 end

```

```

65 n_mensifrv;
66 n_vetsifrv;
67 fr_vetsi=1;
68 fr_mensi=1;
69 podil=n_vetsifrv/(n_mensifrv+1);
70 for i=index;
71     if i<=((podil)*fr_mensi)+(fr_mensi-1);
72         inkr_final(i)=vetsifrv(1);
73         fr_vetsi=fr_vetsi+1;
74     elseif fr_mensi<=n_mensifrv
75         inkr_final(i)=mensifrv(1);
76         fr_mensi=fr_mensi+1;
77     else
78         inkr_final(i)=vetsifrv(1);
79     end
80 end
81 n_mensifrv;
82 mens_frv_prvek=mensifrv(1);
83 n_vetsifrv;
84 vetsi_frv_prvek=vetsifrv(1);
85 inkr_finalni(1)=prvni;
86 inkr_finalni(layers)=posledni;
87 inkr_finalni(2:layers-1)=inkr_final;
88 inkr_finalni;
89 S=sum(inkr_finalni);
90 %vypocet periodnm vektoru
91
92 layer.thickneses=linspace(period/layers,period,layers);
93 index_v3=(2:layers+1);
94 periodnm(1)=period*1000;
95 for i=index_v3;
96     periodnm(i)=periodnm(i-1)-(korekce*inkr_finalni(i-1));
97 end
98 periodnm=periodnm(1:layers);
99 periodnmk=periodnm;
100 periodnmk(layers+1)=0;
101
102 formatSpec='TEXTLIB 9.0.0\nUNIT %s\nRESOLVE %1.0f\nBEGLIB\n\n';
103 fprintf(formatSpec,unit,resolve)
104 for i=layer_lin
105     formatSpec='STRUCT per%1.0fur%1.0f\nLAYER %1.0f\nDATATYPE
106 %1.0f\nB %1.0f, %1.0f, %1.0f, %1.0f, %1.0f, %1.0f, %1.0f, %1.0f,
107 ENDB\nENDSTRUCT\n\n';
108     fprintf(formatSpec,period,i,i,data,periodnmk(layers+2-i),
109 y_0,periodnm(layers+1-i),y_0,periodnm(layers+1-i),
110 field.dim_y*1000,periodnmk(layers+2-i),field.dim_y*1000);
111 end
112 for i=layer_lin
113     formatSpec='STRUCT per%1.0fur%1.0freplication\nLAYER
114 %1.0f\nDATATYPE %1.0f\nAREF per%1.0fur%1.0f (%1.0f, %1.0f)
115 %0f (%0f, %0f) %0f (%0f,%0f)\nENDSTRUCT\n\n';
116     fprintf(formatSpec,period,i,i,data,period,i,x_0,y_0,
117 field.dim_x/period,period*1000,y_0,1,x_0,field.dim_y*1000);
118 end
119 fprintf('ENDLIB\n');

```

B NAPOČÍTANÉ EXPOZIČNÍ DÁVKY

B.1 Reflexní mřížky, 1. řád

Tab. B.1: Data pro reflexní blejzované mřížky naladěné na první řád s počtem úrovní $N = 10$, zapuštění 100 nm. Zkratky: lvl - číslo úrovně.

lvl (dt)	h_{vrstvy} [nm]	3D-PEC dávka [$5 \mu\text{C} \cdot \text{cm}^{-2}$]
1(1)	100,0	41,3232
2(1)	131,6	49,9229
3(1)	163,2	56,2544
4(1)	194,8	60,9154
5(1)	226,4	65,3096
6(1)	258,0	68,6410
7(1)	289,6	72,1424
8(1)	321,2	75,0717
9(1)	352,8	78,1199
10(1)	384,4	80,4870

Tab. B.2: Data pro reflexní blejzované mřížky naladěné na první řád s počtem úrovní $N = 20$, zapuštění 100 nm. Zkratky: lvl - číslo úrovně.

lvl (dt)	h_{vrstvy} [nm]	3D-PEC dávka [$5 \mu\text{C} \cdot \text{cm}^{-2}$]
1(1)	100,0	40,9140
2(1)	115,8	45,1946
3(1)	131,6	49,4286
4(1)	147,4	52,4695
5(1)	163,2	55,6974
6(1)	179,0	57,9589
7(1)	194,8	60,3123
8(1)	210,6	63,3888
9(1)	226,4	64,6630
10(1)	242,2	66,6223
11(1)	258,0	68,6410
12(1)	273,8	70,0207
13(1)	289,6	71,4281
14(1)	305,4	72,8638
15(1)	321,2	74,3284
16(1)	337,0	75,8224
17(1)	352,8	77,6464
18(1)	368,6	78,9011
19(1)	384,4	79,6901
20(1)	400,2	81,2919

B.2 Transmisní mřížky, 1. řád

Tab. B.3: Data pro transmisní blejzované mřížky naladěné na první řád s počtem úrovní $N = 10$, zapuštění 100 nm. Zkratky: lvl - číslo úrovně.

lvl (dt)	h_{vrstvy} [nm]	3D-PEC dávka [$5 \mu\text{C} \cdot \text{cm}^{-2}$]
1(1)	100,0	29,7570
2(1)	226,4	54,0594
3(1)	352,8	66,6223
4(1)	479,2	75,0717
5(1)	605,6	82,9259
6(1)	732,0	88,9077
7(1)	858,4	94,3774
8(1)	984,8	100,1835
9(1)	1111,2	104,2513
10(1)	1237,6	108,4843

Tab. B.4: Data pro transmisní blejzované mřížky naladěné na první řád s počtem úrovní $N = 16$, zapuštění 100 nm. Zkratky: lvl - číslo úrovně.

lvl (dt)	h_{vrstvy} [nm]	3D-PEC dávka [$5 \mu\text{C} \cdot \text{cm}^{-2}$]
1(1)	100	29,1706
2(1)	179	46,1030
3(1)	258	56,8169
4(1)	337	64,6630
5(1)	416	70,7209
6(1)	495	75,8224
7(1)	574	80,4870
8(1)	653	84,5927
9(1)	732	88,0275
10(1)	811	91,6017
11(1)	890	95,3211
12(1)	969	98,2095
13(1)	1048	101,1853
14(1)	1127	104,2513
15(1)	1206	106,3468
16(1)	1285	109,5692

Tab. B.5: Data pro transmisní blejzované mřížky naladěné na první řád s počtem úrovní $N = 20$, zapuštění 100 nm. Zkratky: lvl - číslo úrovně.

lvl (dt)	h_{vrstvy} [nm]	3D-PEC dávka [$5 \mu\text{C} \cdot \text{cm}^{-2}$]
1(1)	100,0	28,8818
2(1)	163,2	43,4311
3(1)	226,4	52,9942
4(1)	289,6	59,7152
5(1)	352,8	65,3096
6(1)	416,0	70,0207
7(1)	479,2	74,3284
8(1)	542,4	78,1199
9(1)	605,6	82,1048
10(1)	668,8	85,4386
11(1)	732,0	88,0275
12(1)	795,2	90,6948
13(1)	858,4	93,4429
14(1)	921,6	96,2743
15(1)	984,8	99,1916
16(1)	1048,0	101,1853
17(1)	1111,2	103,2191
18(1)	1174,4	105,2938
19(1)	1237,6	107,4102
20(1)	1300,8	109,5692

Tab. B.6: Data pro transmisní blejzované mřížky naladěné na první řád s počtem úrovní $N = 32$, zapuštění 100 nm. Zkratky: lvl - číslo úrovně.

lvl (dt)	h_{vrstvy} [nm]	3D-PEC dávka [$5 \mu\text{C} \cdot \text{cm}^{-2}$]
1(1)	100	28,3127
2(1)	139,5	38,5429
3(1)	179,0	45,6465
4(1)	218,5	51,4356
5(1)	258,0	56,2544
6(1)	297,5	59,7152
7(1)	337,0	63,3888
8(1)	376,5	66,6233
9(1)	416,0	70,0207
10(1)	455,5	72,1424
11(1)	495,0	75,0717
12(1)	534,5	77,3464
13(1)	574,0	79,6901
14(1)	613,5	82,1048
15(1)	653,0	83,7551
16(1)	692,5	86,2930
17(1)	732,0	88,0275
18(1)	771,5	89,7968
19(1)	811,0	91,6017
20(1)	850,5	93,4429
21(1)	890,0	94,3774
22(1)	929,5	96,2743
23(1)	969,0	97,2371
24(1)	1008,5	99,1916
25(1)	1048,0	100,1835
26(1)	1087,5	102,1972
27(1)	1127,0	103,2191
28(1)	1166,5	104,2513
29(1)	1206,0	106,3468
30(1)	1245,5	107,4102
31(1)	1285,0	108,4843
32(1)	1324,5	109,5692

B.3 Transmisní mřížky, 2. řád

Tab. B.7: Data pro transmisní blejzované mřížky naladěné na druhý řád s počtem úrovní $N = 10$, zapuštění 500 nm. Zkratky: lvl - číslo úrovně.

lvl (dt)	h_{vrstvy} [nm]	3D-PEC dávka [$5 \mu\text{C} \cdot \text{cm}^{-2}$]
1(1)	500,0	52,4695
2(1)	752,8	87,1559
3(1)	1005,6	114,0181
4(1)	1258,4	133,6952
5(1)	1511,2	152,1576
6(1)	1764,0	166,4126
7(1)	2016,8	180,2010
8(1)	2269,6	193,1998
9(1)	2522,4	203,0550
10(1)	2775,2	213,4128

Tab. B.8: Data pro transmisní blejzované mřížky naladěné na druhý řád s počtem úrovní $N = 16$, zapuštění 500 nm. Zkratky: lvl - číslo úrovně.

lvl (dt)	h_{vrstvy} [nm]	3D-PEC dávka [$5 \mu\text{C} \cdot \text{cm}^{-2}$]
1(1)	500	50,9264
2(1)	658	73,5925
3(1)	816	92,5178
4(1)	974	109,5692
5(1)	1132	122,2429
6(1)	1290	135,0322
7(1)	1448	146,2205
8(1)	1606	156,7682
9(1)	1764	164,7649
10(1)	1922	174,9013
11(1)	2080	182,0030
12(1)	2238	189,3930
13(1)	2396	195,1318
14(1)	2554	203,0550
15(1)	2712	209,2077
16(1)	2870	213,4128

Tab. B.9: Data pro transmisní blejzované mřížky naladěné na druhý řád s počtem úrovní $N = 32$, zapuštění 500 nm. Zkratky: lvl - číslo úrovně

lvl (dt)	h_{vrstvy} [nm]	3D-PEC dávka [$5 \mu\text{C} \cdot \text{cm}^{-2}$]
1(1)	500	49,4286
2(1)	579	62,1398
3(1)	658	72,8638
4(1)	737	82,9259
5(1)	816	91,6017
6(1)	895	100,1835
7(1)	974	107,4102
8(1)	1053	115,1583
9(1)	1132	121,0325
10(1)	1211	127,2064
11(1)	1290	133,6952
12(1)	1369	139,1238
13(1)	1448	144,7728
14(1)	1527	150,6511
15(1)	1606	155,2160
16(1)	1685	159,9192
17(1)	1764	164,7469
18(1)	1843	168,0767
19(1)	1922	173,1696
20(1)	2001	176,6503
21(1)	2080	180,2010
22(1)	2159	183,8230
23(1)	2238	187,5178
24(1)	2317	191,2870
25(1)	2396	195,1318
26(1)	2475	197,0831
27(1)	2554	201,0445
28(1)	2633	205,0856
29(1)	2712	207,1364
30(1)	2791	211,2998
31(1)	2870	213,4128
32(1)	2949	215,5469

C MĚŘENÍ DIFRAKČNÍ ÚČINNOSTI

Přehled kompletních dat naměřených difrakčních účinností. Pro každá řád je uvedena průměrná hodnota difrakční účinnosti a rozšířená nejistota s užitím 95% konfidenčního intervalu Studentova rozdělení.

Tab. C.1: Difrakční účinnosti jednotlivých řádů reflexních blejzovaných mřížek nalažených na první řád, TE polarizace.

mřížka	-3. [%]	-2. [%]	-1. [%]	0. [%]	1. [%]	2. [%]	3. [%]
1um10lvl	0,00	0,00	25,70	30,20	41,17	0,00	0,00
$\Delta\eta_m$	0,00	0,00	2,03	1,79	1,98	0,00	0,00
1um20lvl	0,00	0,00	23,04	48,10	26,20	0,00	0,00
$\Delta\eta_m$	0,00	0,00	0,37	1,17	1,09	0,00	0,00
5um10lvl	1,21	0,91	0,94	1,10	84,86	1,30	0,27
$\Delta\eta_m$	0,32	0,80	0,37	0,29	0,36	0,29	0,30
5um20lvl	2,63	2,29	1,65	1,07	79,01	2,47	0,30
$\Delta\eta_m$	0,39	0,38	0,35	0,31	1,21	0,37	0,28
10um10lvl	0,36	0,30	0,30	2,81	84,59	3,86	0,68
$\Delta\eta_m$	0,28	0,28	0,28	0,28	0,94	0,38	0,29
10um20lvl	0,34	0,30	0,48	4,14	78,16	7,29	1,03
$\Delta\eta_m$	0,30	0,39	0,18	0,20	1,34	0,45	0,36

Tab. C.2: Difrakční účinnosti jednotlivých řádů reflexních blejzovaných mřížek naladěných na první řád, TM polarizace.

mřížka	-3. [%]	-2. [%]	-1. [%]	0. [%]	1. [%]	2. [%]	3. [%]
1um10lvl	0,00	0,00	11,15	5,24	78,71	0,00	0,00
$\Delta\eta_m$	0,00	0,00	0,35	0,89	2,26	0,00	0,00
1um20lvl	0,00	0,00	23,44	26,35	45,18	0,00	0,00
$\Delta\eta_m$	0,00	0,00	0,20	1,28	1,42	0,00	0,00
5um10lvl	0,21	0,16	0,27	1,42	87,02	0,66	0,09
$\Delta\eta_m$	0,07	0,11	0,07	0,04	0,81	0,04	0,04
5um20lvl	1,74	1,12	1,01	0,98	80,41	2,06	0,11
$\Delta\eta_m$	0,03	0,08	0,08	0,04	1,02	0,14	0,04
10um10lvl	0,18	0,09	0,25	3,32	84,98	3,27	0,39
$\Delta\eta_m$	0,11	0,04	0,08	0,09	0,41	0,10	0,04
10um20lvl	0,30	0,07	0,46	4,35	76,33	7,44	1,05
$\Delta\eta_m$	0,11	0,07	0,04	0,13	0,65	0,25	0,04

Tab. C.3: Difrakční účinnosti jednotlivých řádů transmisních blejzovaných mřížek naladěných na první řád, TE polarizace.

mřížka	-3. [%]	-2. [%]	-1. [%]	0. [%]	1. [%]	2. [%]	3. [%]
2um10lvl	0,00	4,54	8,92	14,40	57,78	2,19	0,00
$\Delta\eta_m$	0,00	0,94	0,76	0,58	3,59	3,83	0,00
2um20lvl	0,00	9,57	8,22	30,99	39,55	1,42	0,00
$\Delta\eta_m$	0,00	0,37	0,98	2,74	1,59	1,25	0,00
5um16lvl	1,23	1,11	2,10	4,70	75,85	5,26	0,28
$\Delta\eta_m$	0,14	0,83	1,04	0,63	0,23	0,22	0,21
5um32lvl	0,52	0,57	1,11	7,62	62,02	15,63	0,75
$\Delta\eta_m$	0,29	1,23	2,56	0,67	0,10	0,12	0,04
10um16lvl	0,19	0,31	1,42	2,79	84,77	3,97	0,19
$\Delta\eta_m$	0,04	0,35	0,25	0,16	0,26	0,04	0,04
10um32lvl	0,28	0,57	1,75	10,56	56,01	21,68	1,30
$\Delta\eta_m$	0,04	0,46	0,09	0,10	0,12	0,03	0,12

Tab. C.4: Difrakční účinnosti jednotlivých řádů transmisních blejzovaných mřížek naladěných na první řád, TM polarizace.

mřížka	-3. [%]	-2. [%]	-1. [%]	0. [%]	1. [%]	2. [%]	3. [%]
2um10lvl	0,00	7,89	12,80	13,92	58,36	1,61	0,00
$\Delta\eta_m$	0,00	1,03	1,66	1,37	0,24	0,18	0,00
2um20lvl	0,00	11,07	10,29	33,75	38,86	1,77	0,00
$\Delta\eta_m$	0,00	1,07	0,24	3,35	0,27	0,24	0,00
5um16lvl	1,39	1,11	2,20	4,44	76,01	5,27	0,16
$\Delta\eta_m$	0,15	1,05	1,18	0,75	0,15	0,08	0,14
5um32lvl	0,40	0,42	0,92	7,93	62,76	15,73	0,80
$\Delta\eta_m$	0,37	1,87	2,64	0,68	0,08	0,04	0,08
10um16lvl	0,38	0,38	1,46	2,83	84,04	4,01	0,19
$\Delta\eta_m$	0,08	0,38	0,38	0,08	0,21	0,11	0,18
10um32lvl	0,35	0,52	1,70	11,07	56,49	21,32	1,13
$\Delta\eta_m$	0,13	0,15	0,52	0,22	0,15	0,04	0,25

Tab. C.5: Difrakční účinnosti jednotlivých řádů transmisních blejzovaných mřížek naladěných na druhý řád, TE polarizace.

mřížka	-3. [%]	-2. [%]	-1. [%]	0. [%]	1. [%]	2. [%]	3. [%]
2um10lvl	6,27	3,66	2,68	15,89	24,55	5,85	23,98
$\Delta\eta_m$	3,15	1,72	1,44	0,75	4,00	1,38	0,77
5um16lvl	1,45	3,22	4,01	7,40	3,74	67,88	2,71
$\Delta\eta_m$	0,57	0,28	0,63	0,59	0,30	1,02	0,12
5um32lvl	1,97	4,08	3,94	4,21	5,39	62,37	6,91
$\Delta\eta_m$	0,54	0,76	1,05	0,32	0,39	3,72	0,73
10um16lvl	0,86	1,08	1,70	2,26	11,04	65,77	8,44
$\Delta\eta_m$	0,56	0,54	0,74	0,60	1,85	4,80	1,01
10um32lvl	0,71	0,57	0,84	1,25	18,57	54,58	13,99
$\Delta\eta_m$	0,21	0,38	0,43	0,32	0,98	4,08	1,31

Tab. C.6: Difrakční účinnosti jednotlivých řádů transmisních blejzovaných mřížek naladěných na druhý řád, TM polarizace.

mřížka	-3. [%]	-2. [%]	-1. [%]	0. [%]	1. [%]	2. [%]	3. [%]
2um10lvl	10,99	1,13	2,26	18,27	29,22	7,01	20,61
$\Delta\eta_m$	0,85	0,28	0,56	0,56	2,35	0,47	0,24
5um16lvl	1,35	2,98	4,82	8,85	4,57	66,01	3,59
$\Delta\eta_m$	0,11	0,22	0,61	0,53	0,76	0,98	0,21
5um32lvl	2,19	4,45	3,94	4,53	4,40	64,04	7,38
$\Delta\eta_m$	0,58	1,05	2,37	1,80	0,56	1,97	0,98
10um16lvl	0,93	1,21	1,60	2,04	10,53	64,78	9,40
$\Delta\eta_m$	0,28	0,47	0,42	0,60	0,82	1,71	1,13
10um32lvl	0,91	0,93	1,06	1,50	17,29	54,92	14,68
$\Delta\eta_m$	0,21	0,22	0,21	0,29	0,74	0,76	0,73

D VYHODNOCENÍ - DIFRAKČNÍ ÚČINNOST

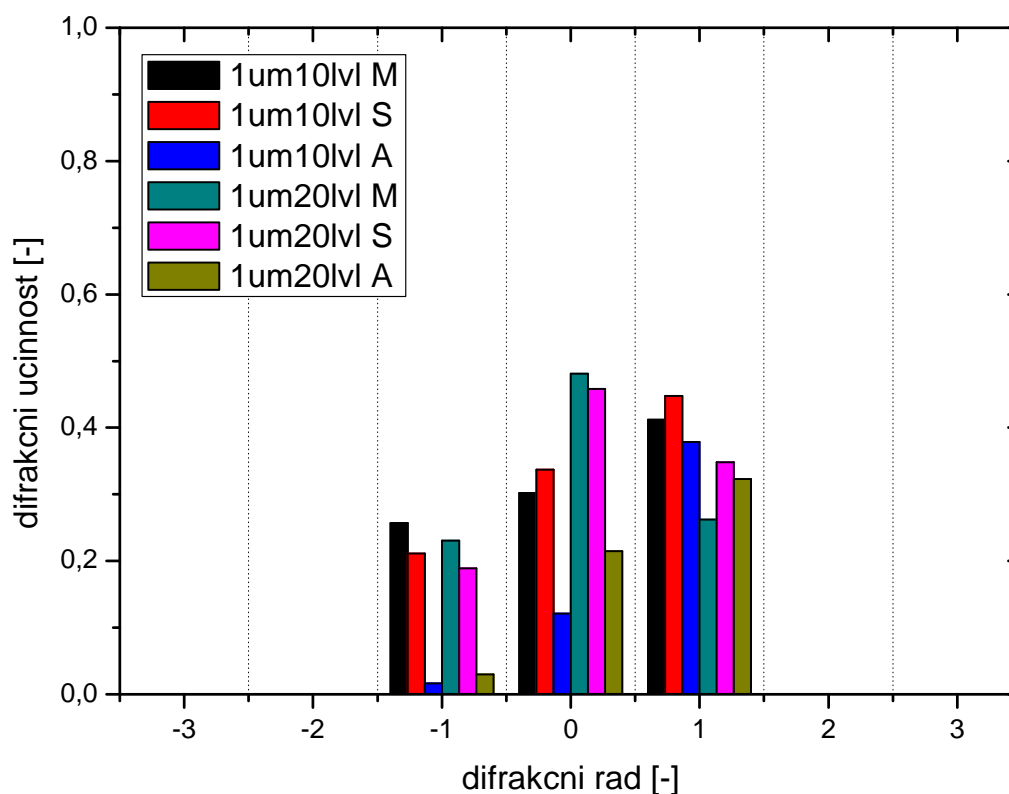
Vysvětlení zkratk v legendě:

M – měření,

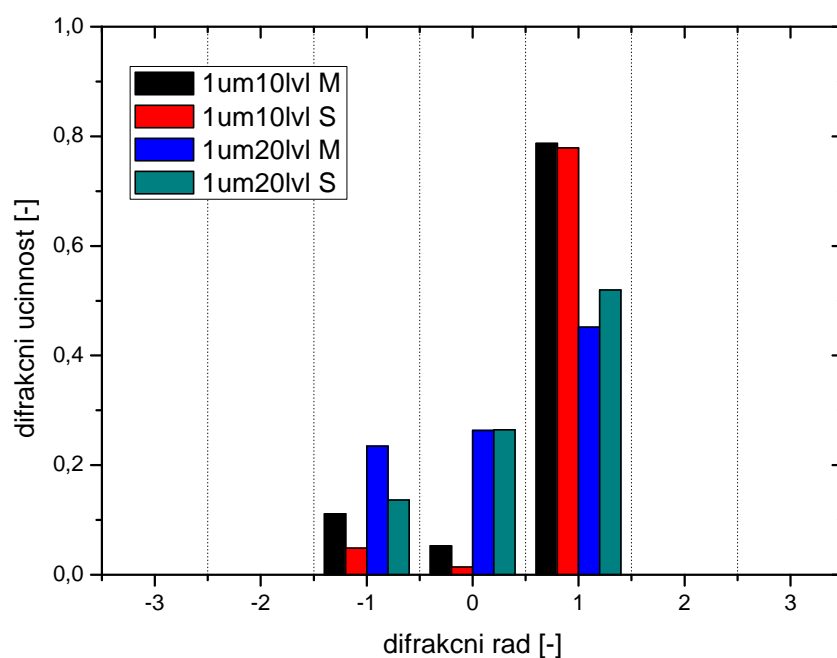
S – simulace v GSolver,

A – analytický výpočet.

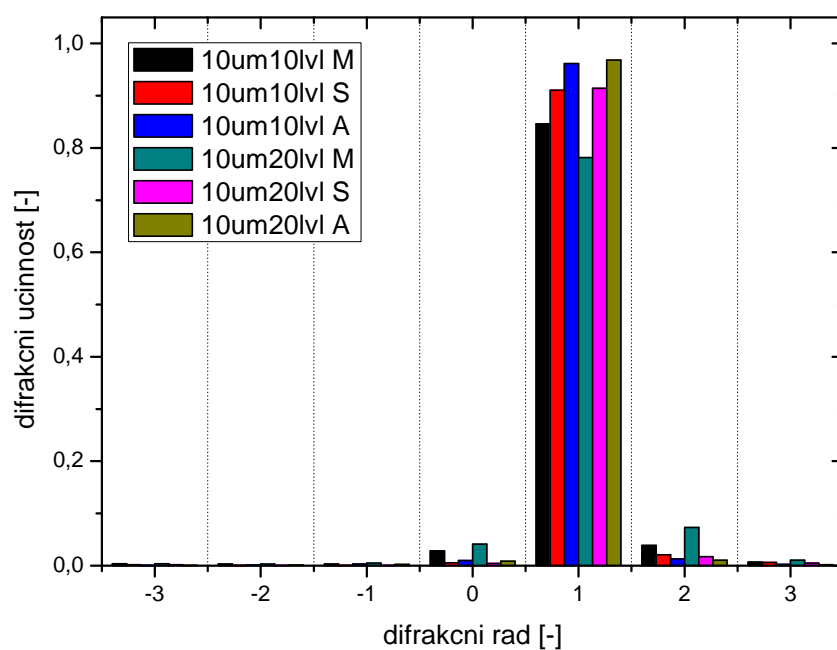
D.1 Reflexní mřížky, 1. řád



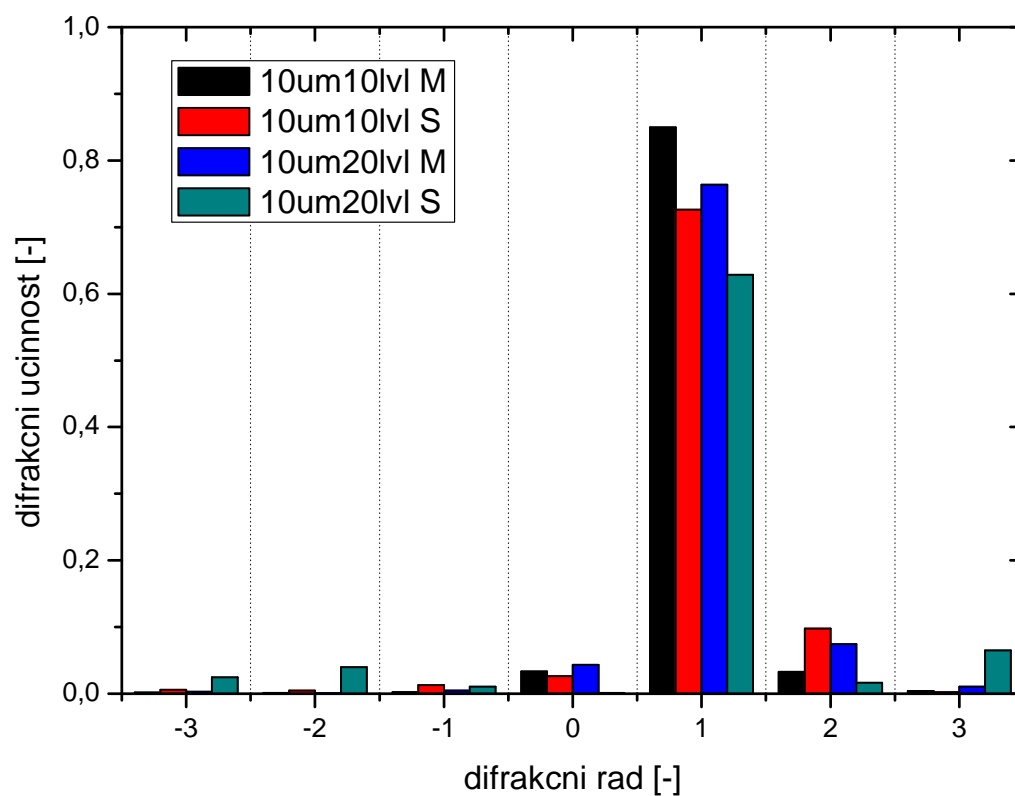
Obr. D.1: Porovnání difrakčních účinností jednotlivých řádů reflexní blejzované mřížky naladěné na první řád ($\Lambda = 1 \mu\text{m}$, $N = 10$ a $N = 20$) pro TE polarizaci dopadajícího světla.



Obr. D.2: Porovnání difrakčních účinností jednotlivých řádů reflexní blejzované mřížky naladěné na první řád ($\Lambda = 1 \mu\text{m}$, $N = 10$ a $N = 20$) pro TM polarizaci dopadajícího světla.

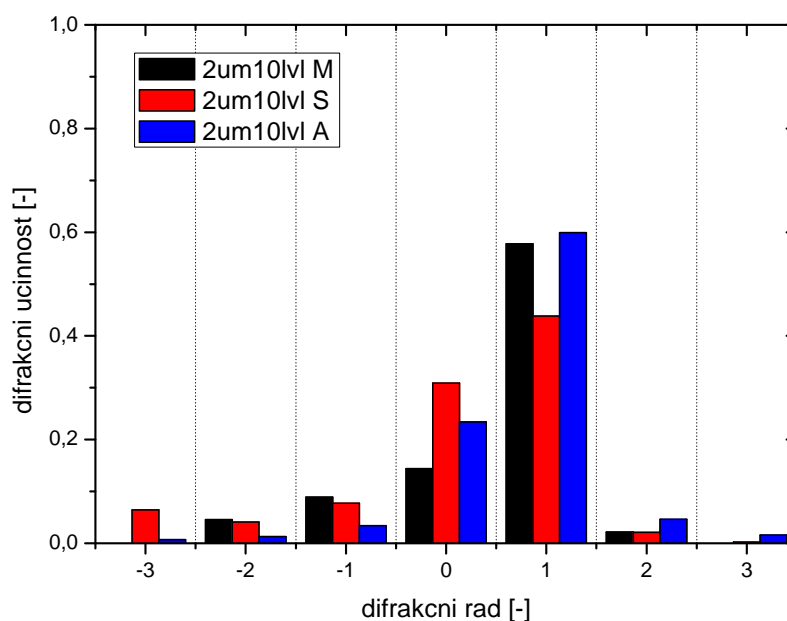


Obr. D.3: Porovnání difrakčních účinností jednotlivých řádů reflexní blejzované mřížky naladěné na první řád ($\Lambda = 10 \mu\text{m}$, $N = 10$ a $N = 20$) pro TE polarizaci dopadajícího světla.

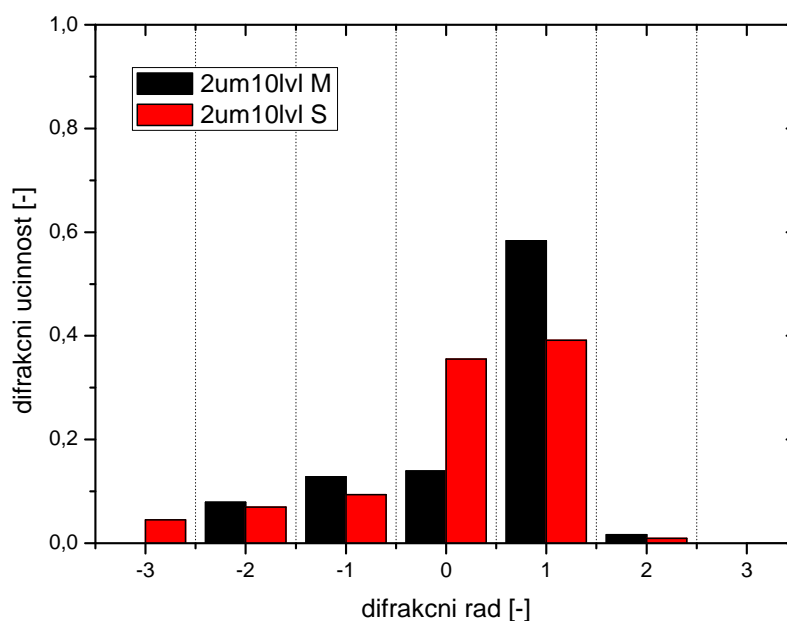


Obr. D.4: Porovnání difrakčních účinností jednotlivých řádů reflexní blejzované mřížky naladěné na první řád ($\Lambda = 10 \mu\text{m}$, $N = 10$ a $N = 20$) pro TM polarizaci dopadajícího světla.

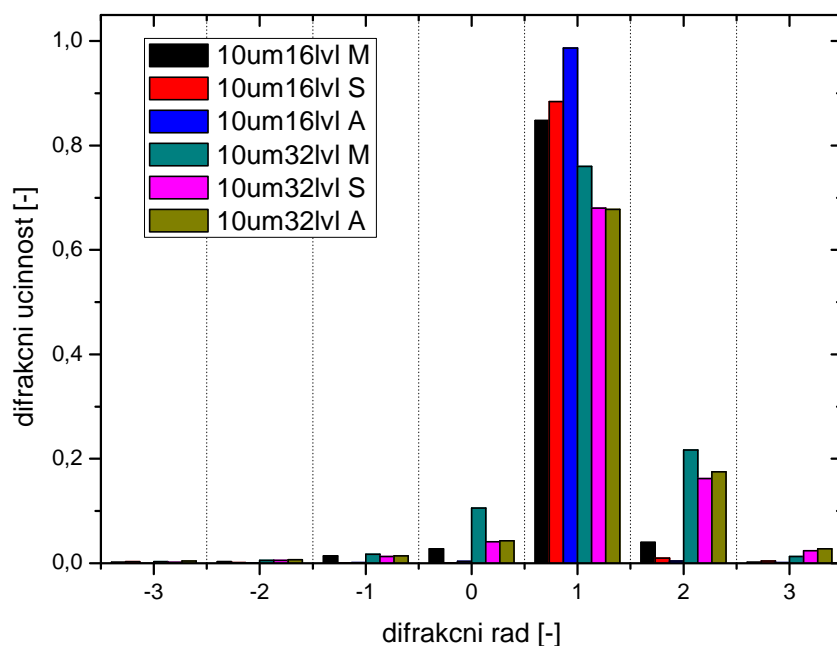
D.2 Transmisní mřížky, 1. řád



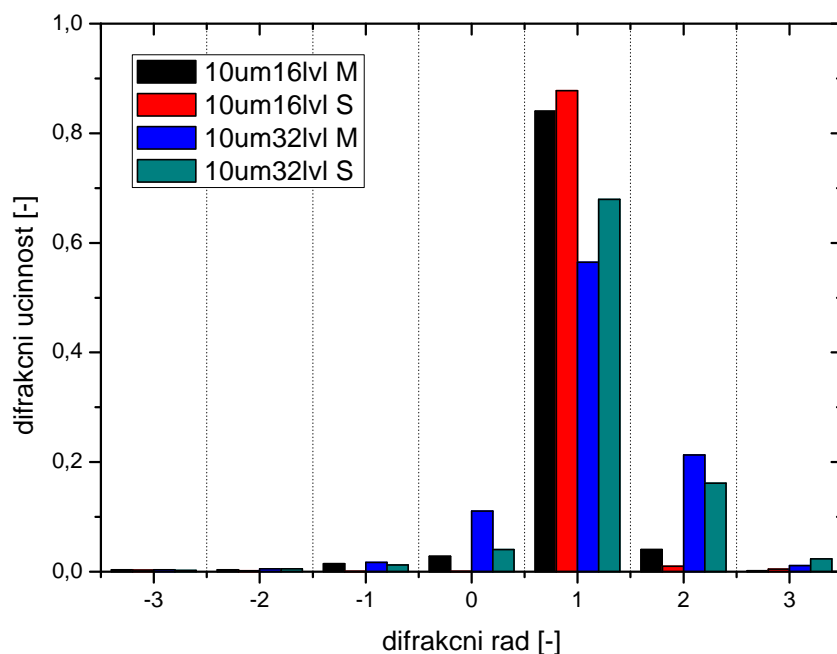
Obr. D.5: Porovnání difrakčních účinností jednotlivých řádů transmisní blejzované mřížky naladěné na první řád ($\Lambda = 2 \mu\text{m}$, $N = 10$) pro TE polarizaci dopadajícího světla.



Obr. D.6: Porovnání difrakčních účinností jednotlivých řádů transmisní blejzované mřížky naladěné na první řád ($\Lambda = 2 \mu\text{m}$, $N = 10$) pro TM polarizaci dopadajícího světla.

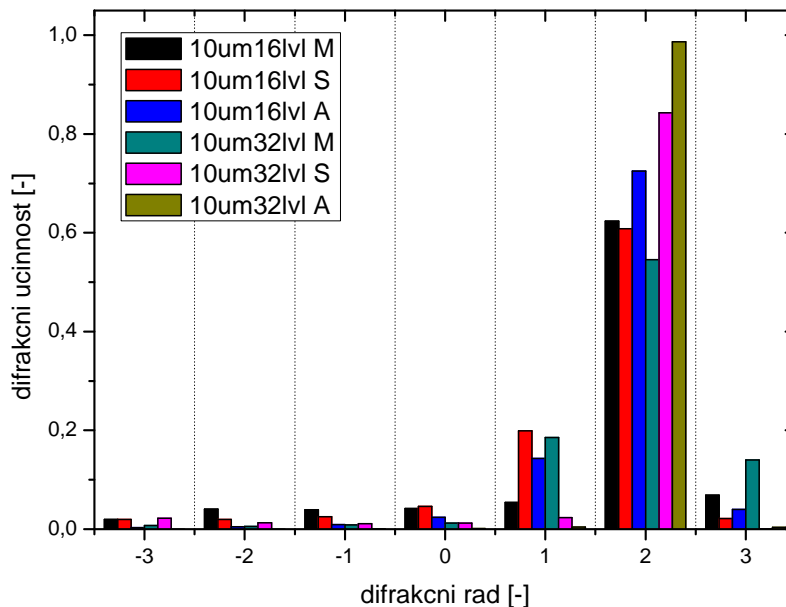


Obr. D.7: Porovnání difrakčních účinností jednotlivých řádů transmisní blejzované mřížky naladěné na první řád ($\Lambda = 10 \mu\text{m}$, $N = 16$ a $N = 32$) pro TE polarizaci dopadajícího světla.

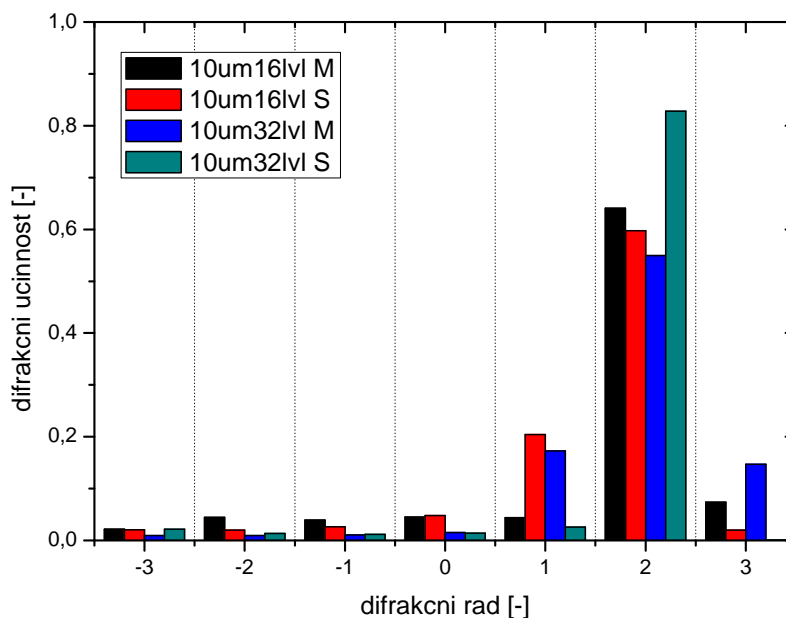


Obr. D.8: Porovnání difrakčních účinností jednotlivých řádů transmisní blejzované mřížky naladěné na první řád ($\Lambda = 10 \mu\text{m}$, $N = 16$ a $N = 32$) pro TM polarizaci dopadajícího světla.

D.3 Transmisní mřížky, 2. řád



Obr. D.9: Porovnání difrakčních účinností jednotlivých řádů transmisní blejzované mřížky naladěné na druhý řád ($\Lambda = 10 \mu\text{m}$, $N = 16$ a $N = 32$) pro TE polarizaci dopadajícího světla.



Obr. D.10: Porovnání difrakčních účinností jednotlivých řádů transmisní blejzované mřížky naladěné na druhý řád ($\Lambda = 10 \mu\text{m}$, $N = 16$ a $N = 32$) pro TM polarizaci dopadajícího světla.